



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΑΓΡΟΝΟΜΩΝ ΚΑΙ ΤΟΠΟΓΡΑΦΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
Τομέας Τοπογραφίας - Εργαστήριο Τηλεπισκόπησης
Δ.Π.Μ.Σ. ΓΕΩΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗ

ΕΝΤΟΠΙΣΜΟΣ ΦΥΛΛΩΜΑΤΟΣ ΣΕ ΑΜΠΕΛΩΝΕΣ
ΓΡΑΜΜΙΚΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗΣ ΑΠΟ
ΔΟΡΥΦΟΡΙΚΕΣ ΠΟΛΥΦΑΣΜΑΤΙΚΕΣ ΕΙΚΟΝΕΣ

Μεταπτυχιακή Εργασία

Ελένη Γουνελά

Αθήνα, Οκτώβριος 2019



NATIONAL TECHNICAL UNIVERSITY OF ATHENS

SCHOOL OF RURAL AND SURVEYING ENGINEERING

Department of Topography - Remote Sensing Laboratory

GEOINFORMATICS, post-graduate MSc program

**CANOPY DETECTION IN LINEAR VINEYARDS
FROM MULTISPECTRAL SATELLITE DATA**

Master's Thesis

Eleni Gounela

Athens, October 2019



RS Lab

Remote Sensing Laboratory
National Technical University of Athens

✓ Sensing ✓ Analytics ✓ Monitoring



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
Δ.Π.Μ.Σ. ΓΕΩΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗ

**Εντοπισμός Φυλλώματος σε Αμπελώνες Γραμμικού
Συστήματος Διαμόρφωσης από Δορυφορικές
Πολυφασματικές Εικόνες**

Μεταπτυχιακή Εργασία

Ελένη Γουνελά

Τριμελής Εξεταστική Επιτροπή:

Κ. Καραντζαλος

Δ. Αργιαλάς

Αν. Δουλάμης

.....

Αν. Καθηγητής Ε.Μ.Π.	Καθηγητής Ε.Μ.Π.	Επίκουρος Καθηγητής
Επιβλέπων		

Αθήνα, Οκτώβριος 2019

Γουνελά Ελένη

Πτυχιούχος Γεωπόνος Γ.Π.Α.



Copyright © All rights reserved. Γουνελά Ελένη, 2019

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος.

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ' ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς το συγγραφέα. Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν το συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.



Ευχαριστίες

Πρωτίστως, ευχαριστώ από καρδιάς τον επιβλέποντα καθηγητή της διπλωματικής μου εργασίας κ. Κωνσταντίνο Καραντζαλο για την καθοριστική του συμβολή, την καθοδήγηση και τη στήριξη που μου παρείχε καθ' όλη τη διάρκεια εκπόνησης της εργασίας μου. Τον ευχαριστώ για τις γνώσεις και τις συμβουλές που μου προσέφερε, που ανέπτυξαν το ζήλο μου για περαιτέρω εμβάθυνση στο παρόν επιστημονικό αντικείμενο και με έκαναν ικανή να αντιμετωπίζω κάθε πρόβλημα. Επίσης, τον ευχαριστώ για τη διαρκή παρουσία του, την άμεση ανταπόκριση σε κάθε δυσκολία και την εμπιστοσύνη που μου έδειξε σε κάθε βήμα αυτής της προσπάθειας.

Ιδιαίτερες ευχαριστίες οφείλω στη Χριστίνα Καρακίζη, για τη συνεχή στήριξη, τη συμπαράσταση και την αμέριστη βοήθεια που μου παρείχε απλόχερα. Οι καθοριστικές της συμβουλές και η φιλική της διάθεση συνετέλεσαν στην επιτυχή ολοκλήρωση αυτής της εργασίας και με βοήθησαν να μην τα παρατάω στα δύσκολα.

Ένα μεγάλο ευχαριστώ οφείλω και στο Ζαχαρία Κανδυλάκη, για τη βοήθεια που μου παρείχε απλόχερα, ιδιαίτερα στο προγραμματιστικό κομμάτι αυτής της εργασίας. Η ικανότητά του να δίνει λύσεις σε σύνθετα προβλήματα αποδείχθηκε καθοριστική για την αντιμετώπιση των δυσκολιών που προέκυψαν στα πλαίσια αυτής της προσπάθειας.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Αριστείδη Βαϊόπουλο για τη συνεισφορά του στις προεπεξεργασίες των δεδομένων και συγκεκριμένα για τη συμβολή του στην υλοποίηση του ran-sharpening. Ευχαριστώ επίσης τον Πολ Κολοκούση για τη βοήθεια σε πρακτικά ζητήματα της εργασίας.

Ευχαριστώ ιδιαίτερα τους καθηγητές κ. Δημήτριο Αργιαλά και κ. Αναστάσιο Δουλάμη για το ενδιαφέρον που έδειξαν και την παράθεση χρήσιμων παρατηρήσεων για περαιτέρω εμβάθυνση της παρούσας εργασίας.

Τέλος, ευχαριστώ την οικογένειά μου για την αμέριστη συμπαράσταση στην προσπάθειά μου και στην εκπλήρωση των σπουδών μου.

Ελένη Γουνελά

Αθήνα, Οκτώβριος 2019

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η σημερινή επιτακτική ανάγκη για τον συστηματικό σε μεγάλες γεωγραφικές κλίμακες εντοπισμό καλλιεργειών και των διάφορων κατηγοριών τους, στο πλαίσιο εφαρμογών Γεωργίας Ακρίβειας, καθιστά την αξιοποίηση της διαθέσιμης πληθώρας τηλεπισκοπικών δεδομένων καθώς και την ανάπτυξη προηγμένων τεχνικών επεξεργασίας τους, ένα σύγχρονο αντικείμενο επιστημονικής βασικής και εφαρμοσμένης έρευνας. Προς αυτή την κατεύθυνση, στην παρούσα εργασία σχεδιάστηκε, αναπτύχθηκε και αξιολογήθηκε ένα σύστημα ταξινόμησης για τον εντοπισμό του φυλλώματος σε αμπελώνες γραμμικού συστήματος διαμόρφωσης μέσω του διαχωρισμού του φυλλώματος των αμπελιών από το ενδιαμέσο έδαφος. Η προτεινόμενη μεθοδολογία εφαρμόστηκε σε δορυφορικά δεδομένα πολύ υψηλής ανάλυσης (WorldView-3 και WorldView-2) σε επτά περιοχές μελέτης, όλες σε σημαντικές οινοπαραγωγικές ζώνες της Ελλάδας. Οι βασικές προεπεξεργασίες περιλάμβαναν τις ραδιομετρικές και ατμοσφαιρικές διορθώσεις των δορυφορικών εικόνων, καθώς και τη συγχώνευση των πολυφασματικών με τις παγχρωματικές εικόνες. Επιπλέον, υλοποιήθηκε εξομάλυνση των εικόνων, υπολογίστηκαν ορισμένοι φασματικοί δείκτες και χαρακτηριστικά υφής και παρήχθησαν δεδομένα ελέγχου για κάθε εικόνα. Κατά το πρώτο στάδιο της κυρίως μεθοδολογίας, δημιουργήθηκε ο φασματικός υπερκύβος κάθε εικόνας, που περιλάμβανε 13 χαρακτηριστικά για την ταξινόμηση, δηλαδή 8 φασματικά κανάλια, 4 δείκτες βλάστησης και το χαρακτηριστικό υφής κατά Gabor. Ακολούθησε η επιβλεπόμενη ταξινόμηση κάθε εικόνας με εφαρμογή του αλγορίθμου Random Forest. Για κάθε περιοχή έγιναν πειράματα με διαφορετικά ποσοστά δεδομένων εκπαίδευσης και ελέγχου για την ταξινόμηση. Επιπρόσθετα, υλοποιήθηκαν πειράματα με συνδυασμό δεδομένων από διαφορετικές περιοχές και επιπλέον πειραματισμό στο διαχωρισμό των ποσοστών εκπαίδευσης και ελέγχου. Από την ποσοτική αξιολόγηση των αποτελεσμάτων προέκυψε ότι οι ταξινομήσεις ανά περιοχή μελέτης απέδωσαν επιτυχώς το φύλλωμα των αμπελιών, καθώς επιτεύχθηκαν πολύ υψηλά ποσοστά Ολικής Ακρίβειας (>97%). Στις ταξινομήσεις με συνδυασμό εικόνων τα αποτελέσματα ήταν λιγότερο επιτυχημένα, καθώς τα ποσοστά Ολικής Ακρίβειας κυμάνθηκαν από <50% έως και >90%. Από την εφαρμογή της προτεινόμενης μεθοδολογίας και την ανάλυση των αποτελεσμάτων συμπεραίνεται ότι επιτυχής ταξινόμηση σε εικόνες που δεν έχουν συμμετάσχει στην εκπαίδευση του μοντέλου/ταξινομητή, προκύπτει με προϋπόθεση την φασματική ομοιότητα στις δύο υπό διαχωρισμό κατηγορίες μεταξύ των εικόνων εκπαίδευσης και ελέγχου και κατ' επέκταση εμμέσως με την ομοιότητα στις καλλιεργητικές πρακτικές των περιοχών. Από τη συνολική ποσοτική και ποιοτική αξιολόγηση της αναπτυχθείσας μεθοδολογίας προκύπτει η επιτυχής πλήρωση των στόχων της παρούσας εργασίας και δημιουργούνται προσδοκίες για την ανάπτυξη προηγμένων λειτουργικών εφαρμογών στον ευρύτερο κλάδο της Γεωργίας Ακρίβειας.

CANOPY DETECTION IN LINEAR VINEYARDS FROM MULTISPECTRAL SATELLITE DATA

Eleni Gounela

Master's Thesis

October 2019

ABSTRACT

In order to operationally exploit remote sensing data for Precision Agriculture applications, the development of state-of-the-art analytics based on machine learning techniques is required towards the accurate and large-scale crop detection and classification. To this end, we have designed, developed and evaluated a classification system for the canopy detection in vineyards of linear configuration system via the separation of vine-canopy from the intermediate soil. The validation of the developed methodology framework was carried out on very high-resolution satellite data (WorldView-3 and WorldView-2) at seven study areas, all of them belonging to top-rank viticulture regions of Greece. The initial preprocessing step included radiometric and atmospheric corrections on the satellite imagery and also the pan-sharpening of the multispectral and panchromatic images. In addition, image smoothing was implemented, spectral indices and texture characteristics were calculated and ground truth data was generated for each image. In the first step of the core methodology, the spectral super-cube of each image was created, containing 13 features, i.e., 8 spectral bands, 4 vegetation indices and Gabor texture feature. The supervised classification of each image followed using a Random Forest algorithm. Experiments were performed on each image with different percentages of training and testing data for the classification. Additional experiments were performed using a combination of images and different parameterization for the training and testing percentages. More specifically, classifications were implemented using training data for the model creation from some images while implementing and evaluating the model on different images. The quantitative evaluation of the results indicated that the classifier was able to detect successfully the vine canopy in the classification experiments by study area, as it was validated with high rates of Overall Accuracy (>97%). Classification experiments using multiple images gave less successful results as the Overall Accuracy rates ranged from 50% to 90%. The implementation of the proposed methodology and the results' analysis came to the conclusion that the spectral similarity for the two classes to be separated, between images used for training and images used for testing, is a prerequisite for achieving successful results when classifying on multiple images. In overall, the performed quantitative and qualitative evaluation highlighted the effectiveness of advanced image classification techniques for the canopy detection of vineyards and the separation from the intermediate soil, and also raised expectations for the development of operational applications in Precision Agriculture and Viticulture.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	11
1.1 Αντικείμενο και Στόχοι της εργασίας	11
1.2 Κίνητρο και Συνεισφορά της εργασίας	11
2. ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑΣ.....	13
2.1 Χαρακτηριστικά Αμπέλου και Ποικιλίες	13
2.2 Γεωργία και Αμπελουργία Ακριβείας.....	34
2.3 Τηλεπισκοπικά Δεδομένα και Τεχνικές Ανίχνευσης Φυλλώματος.....	36
2.4 Ταξινόμηση Εικόνας και Αλγόριθμοι Μηχανικής Μάθησης	39
2.5 Συνδυαστικοί Ταξινομητές και Ταξινομητής Random Forest.....	42
3. ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ	46
3.1 Συλλογή Δεδομένων.....	46
3.1.1 Περιοχές Μελέτης.....	46
3.1.2 Πολυφασματικά τηλεπισκοπικά δεδομένα WorldView-3	48
3.2 Προεπεξεργασίες Δεδομένων.....	54
3.2.1 Ραδιομετρική και Ατμοσφαιρική διόρθωση εικόνων	54
3.2.2 Συγχώνευση πολυφασματικής και παγχρωματικής εικόνας (Pan-sharpening). ..	60
3.2.3 Ανακατανομή Ιστογράμματος Εικόνων (Rescale).....	70
3.2.4 Παραγωγή Δεδομένων Ελέγχου (Ground Truth)	72
3.2.5 Εξομάλυνση Εικόνων (Smoothing)	74
3.2.6 Δείκτες Βλάστησης	75
3.2.7 Χαρακτηριστικά Υφής	78
3.3 Ταξινόμηση Δορυφορικών Εικόνων	80
3.3.1 Παραγωγή Φασματικού Υπερκύβου	80
3.3.2 Κατηγορίες Ταξινόμησης και Σχεδιασμός Πειραμάτων	80
3.3.3 Ποιοτική και Ποσοτική Αξιολόγηση.....	84
4. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ.....	87
4.1 Πειράματα Random Forest ανά εικόνα.....	87
4.1.1 Πειράματα ανά περιοχή μελέτης	87
4.1.2 Συνολική Αξιολόγηση Πειραμάτων Ανά Περιοχή	164
4.2 Πειράματα Ταξινόμησης με Συνδυασμό Περιοχών	166
4.2.1 Πειράματα με χρήση του συνόλου των δεδομένων ελέγχου (άνισο μέγεθος δειγμάτων).....	171
4.2.2 Πειράματα με χρήση μέρους των δεδομένων ελέγχου (ίσο μέγεθος δειγμάτων)	180

5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ	195
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	198
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ.....	203
Πίνακας Σχημάτων	203
Πίνακας Πινάκων.....	203
Πίνακας Εικόνων	208

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στο παρόν εισαγωγικό κεφάλαιο καθορίζεται και αναλύεται το αντικείμενο και οι στόχοι της παρούσας μεταπτυχιακής εργασίας και ακολούθως αναλύονται τα κίνητρα και η συνεισφορά της.

1.1 Αντικείμενο και Στόχοι της εργασίας

Κύριο αντικείμενο της παρούσας εργασίας αποτέλεσε η διερεύνηση, ανάπτυξη, εφαρμογή και αξιολόγηση σύγχρονων μεθόδων και αλγορίθμων τηλεπισκόπησης για τον εντοπισμό του φυλλώματος της αμπέλου. Πιο συγκεκριμένα, συλλέχθηκαν και αναλύθηκαν γεωχωρικά δεδομένα και ειδικότερα δορυφορικές εικόνες πολύ υψηλής χωρικής ανάλυσης, και αναπτύχθηκαν τεχνικές για την επεξεργασία τους και την παραγωγή αποτελεσμάτων με στόχο την επίλυση υπαρκτών προβλημάτων που αφορούν στην καλλιέργεια του αμπελιού σε μεγάλες χωρικές κλίμακες.

Στόχος της προκείμενης εργασίας ήταν η ανάπτυξη, εφαρμογή και αξιολόγηση μεθοδολογίας για την επιβλεπόμενη ταξινόμηση των δορυφορικών εικόνων με σκοπό: α) τον εντοπισμό του φυλλώματος των αμπελιών και β) τον ταυτόχρονο διαχωρισμό των αμπελιών από το ενδιαμέσο έδαφος, σε πολυφασματικά, συγχωνευμένα (pan-sharpened), πολύ υψηλής χωρικής ανάλυσης δορυφορικά δεδομένα. Τα δεδομένα αυτά προήλθαν από δύο δέκτες, έξι εικόνες από το δορυφορικό αισθητήρα WorldView-3 και μία εικόνα από το δορυφορικό αισθητήρα WorldView-2. Βασική επιδίωξη κατά την ανάπτυξη της μεθοδολογίας ήταν η κατά το δυνατόν μεγαλύτερη τυποποίηση των διαδικασιών της προεπεξεργασίας των δεδομένων και της ταξινόμησης, με απώτερο στόχο τη μελλοντική τους αυτοματοποίηση για δεδομένα από τους συγκεκριμένους δορυφορικούς αισθητήρες. Η εφαρμογή της μεθοδολογίας στα διαθέσιμα δεδομένα στόχευσε στην παραγωγή αποτελεσμάτων που θα αξιολογούνταν με υψηλούς δείκτες επιτυχίας. Ένας επιπλέον στόχος ήταν η μελέτη και η ερμηνεία των αποτελεσμάτων και της αξιολόγησης για την εξαγωγή συμπερασμάτων για τα τεχνικά χαρακτηριστικά της μεθοδολογίας και για το αντικείμενο μελέτης, δηλαδή την καλλιέργεια της αμπέλου.

1.2 Κίνητρο και Συνεισφορά της εργασίας

Βασικό κίνητρο για την υλοποίηση της παρούσας εργασίας αποτέλεσε η σημερινή ανάγκη για αυτοματοποιημένες λύσεις στο πλαίσιο εφαρμογών αμπελουργίας ακριβείας, για την αυτοματοποίηση δηλαδή των επιμέρους σταδίων επεξεργασίας: από τα αρχικά δεδομένα παρατήρησης στην παραγωγή χαρτών και πληροφορίας για τη βελτιστοποιημένη διαχείριση των γεωργικών διαδικασιών ως πλήρωση των αναγκών των καλλιεργητών, των γεωπόνων και των οινολόγων με απώτερο σκοπό να έχουν πλήρη επίβλεψη του συνόλου της καλλιέργειας και ταυτόχρονα να μελετούν την παραλλακτικότητα και τις ιδιαιτερότητες στο εσωτερικό κάθε αμπελοτεμαχίου.

Πιο συγκεκριμένα, η προκείμενη εργασία συνεισφέρει στην έρευνα του συγκεκριμένου επιστημονικού αντικειμένου με τρεις συνιστώσες:

- α. Ανάπτυξη, εφαρμογή και αξιολόγηση μεθοδολογίας προεπεξεργασίας δορυφορικών δεδομένων πολύ υψηλής χωρικής ανάλυσης, που προέρχονται από το δορυφορικό αισθητήρα WorldView-3.
- β. Ανάπτυξη, εφαρμογή και αξιολόγηση μεθοδολογίας επιβλεπόμενης ταξινόμησης για τον εντοπισμό του φυλλώματος στην καλλιέργεια αμπέλου και το διαχωρισμό των αμπελιών από το ενδιάμεσο έδαφος σε πολυφασματικά, συγχωνευμένα (pan-sharpened), πολύ υψηλής χωρικής ανάλυσης δορυφορικά δεδομένα.
- γ. Μελέτη και ανάλυση των φασματικών ιδιοτήτων του αμπελιού και του ενδιάμεσου εδάφους, καθώς και του βαθμού διαχωριστικότητάς τους σε σχέση με τις καλλιεργητικές πρακτικές.

2. ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑΣ

2.1 Χαρακτηριστικά Αμπέλου και Ποικιλίες

Το αμπέλι (ή κλήμα) είναι αγγειόσπερμο φυτό που ανήκει στην οικογένεια των Αμπελοειδών (Vitaceae) και στο γένος *Vitis*, με κυριότερο είδος το *Vitis vinifera* (άμπελος ή οиноφόρος). Είναι πολυετές φυτό με πολλές ποικιλίες που καλλιεργούνται στις εύκρατες περιοχές της γης για τον καρπό του, το σταφύλι, που καταναλώνεται είτε ως επιτραπέζιος καρπός, είτε μεταποιείται σε σταφίδα, κρασί ή άλλα οينوπνευματώδη ποτά (τσίπουρο) ή ακόμα και σε οινόπνευμα (αιθανόλη).

Μορφολογία-Πολλαπλασιασμός

Τα μέρη του φυτού που είναι ξυλώδη είναι μόνιμα, ενώ τα πράσινα μέρη (φύλλα, σταφύλια) είναι ετήσια. Το αμπέλι έχει πολύ βαθύ ριζικό σύστημα, ώστε να βρίσκει υγρασία ακόμα και στις ξερές περιόδους του έτους. Το ενεργό του ριζόστρωμα φτάνει στα 60-80 cm. Ο κορμός είναι η προέκταση της κύριας ρίζας και μέσω αυτού γίνεται η κυκλοφορία των χυμών για την τροφοδοσία του φυτού. Ο κορμός του αμπελιού έχει πολλές διακλαδώσεις και αρκετούς βραχίονες και βλαστάρια. Οι βλαστοί γίνονται με την πάροδο του χρόνου ξυλώδεις βραχίονες που ονομάζονται βέργες, κληματόβέργες ή κληματίδες. Το κλήμα έχει βλαστούς και κληματίδες διαφόρων ηλικιών. Κάθε βλαστός αποτελείται από τη βάση και την κορυφή που αυξάνεται, τους κόμπους, τα φύλλα και τους έλικες, που χρησιμεύουν στην αναρρίχηση του φυτού, καθώς και τους μεσοκάρδιους βλαστούς και τις ταξιανθίες που εξελίσσονται σε σταφύλια. Τα φύλλα του αμπελιού είναι μεγάλα, έχουν παλαμοειδές σχήμα και φύονται από το βλαστό με μίσχο. Ανάλογα με την ποικιλία παρουσιάζονται διαφορές στο σχήμα, στο χρώμα, στο χνούδι στην κάτω επιφάνεια και στο μέγεθος των φύλλων. Το αμπέλι ανθίζει την άνοιξη και το χρώμα των ανθών είναι κιτρινοπράσινο.

Ο πολλαπλασιασμός του αμπελιού γίνεται με δύο τρόπους: με μόσχευμα ή με εμβολιασμό. Και στις δύο περιπτώσεις χρησιμοποιούνται κληματόβέργες, στο μόσχευμα η βέργα είναι μέσης ηλικίας, ενώ στον εμβολιασμό λαμβάνεται βέργα από μικρής ηλικίας αμπέλι. Για τη ριζοβολήση του μοσχεύματος ιδανική θερμοκρασία είναι 23-29 °C. Αφού ριζοβολήσει η βέργα και βγουν τα πρώτα μικρά φύλλα, το μόσχευμα μεταφέρεται από το δοχείο ριζοβολίας στο χωράφι. Ο πολλαπλασιασμός με εμβολιασμό αποτελεί πιο δύσκολη διαδικασία, καθώς το αμπέλι πρέπει να χαραχθεί και να ενωθεί με την κληματόβέργα-εμβόλιο και το σημείο της ένωσης να καλύπτεται καλά από το έδαφος.

Εγκατάσταση αμπελώνων

Η εγκατάσταση ενός νέου αμπελώνα είναι μία σύνθετη διαδικασία που επηρεάζεται από πολλές παραμέτρους. Αρχικά, πρέπει να ληφθεί υπόψη η τοποθεσία, έτσι ώστε το αμπέλι να δέχεται τις ευεργετικές επιδράσεις του ήλιου και του αέρα, δηλαδή να αξιοποιείται στο μέγιστο το μικροκλίμα της περιοχής. Μεγάλη σημασία διαδραματίζει και η κατάσταση του εδάφους στο οποίο θα φυτευτεί το αμπέλι, η οποία προσδιορίζεται με μία εδαφολογική μελέτη που παρέχει στοιχεία για βασικά χαρακτηριστικά όπως το pH, οι φυσικές και χημικές ιδιότητες του εδάφους. Επιπλέον,

πρέπει να αποφασιστεί η ποικιλία που θα φυτευτεί, η διάταξη και ο προσανατολισμός που θα ακολουθεί το αμπέλι και να προετοιμαστεί το χωράφι για την εγκατάσταση του νέου αμπελώνα. Ιδανική περίοδος για την εγκατάσταση ενός νέου αμπελώνα είναι από την άνοιξη μέχρι τον Ιούνιο. Κατά τη φύτευση τοποθετούνται υποστυλώματα στα οποία προσδένονται τα κλήματα, ώστε να αποκτήσουν ίσιο κορμό και ανθεκτικούς βραχίονες.

Εδαφικές Απαιτήσεις

Ιδανικά εδάφη για την καλλιέργεια του αμπελιού αποτελούν τα αμμοχαλικώδη εδάφη, ελαφράς σύστασης και μέτριας γονιμότητας. Τα εδάφη αυτά χαρακτηρίζονται από καλή στράγγιση, λόγω της κοκκομετρικής τους σύστασης, με αποτέλεσμα να απαιτείται επαρκής εφοδιασμός τους με νερό για να καλύπτονται οι υδατικές ανάγκες της καλλιέργειας. Επιπλέον, λόγω του μεγάλου τους πορώδους θερμαίνονται ευκολότερα, εξασφαλίζοντας έτσι γρήγορη ανάπτυξη του ριζικού συστήματος και πρωίμηση της ωρίμανσης της παραγωγής. Το pH του εδάφους που ενδείκνυται για αμπελοκαλλιέργεια κυμαίνεται μεταξύ 6,5-7,5. Επιπλέον, τα επικλινή εδάφη θεωρούνται κατάλληλα για αμπελοκαλλιέργεια, καθώς δεν πλήττονται εύκολα από παγετούς και παράγουν καλύτερης ποιότητας σταφύλια.

Το έδαφος αποτελεί παράγοντα καθοριστικής σημασίας για την καλλιέργεια της αμπέλου, καθώς οι φυσικές και χημικές του ιδιότητες επηρεάζουν τόσο την ανάπτυξη των αμπελιών όσο και τα ποιοτικά χαρακτηριστικά των παραγόμενων σταφυλιών που προορίζονται για οινοποίηση. Τα κύρια θρεπτικά στοιχεία που είναι απαραίτητα για την ανάπτυξη των αμπελιών είναι τα μακροστοιχεία Άζωτο (N), Φώσφορος (P) και Κάλιο (K). Επίσης, σε μικρότερες ποσότητες απαιτούνται και τα ιχνοστοιχεία Ασβέστιο (Ca), Μαγνήσιο (Mg), Βόριο (B), Ψευδάργυρος (Zn), Μαγγάνιο (Mn) και Σίδηρος (Fe). Πιο συγκεκριμένα, το κάλιο επηρεάζει τα σάκχαρα και το ασβέστιο τις αρωματικές ουσίες των σταφυλιών. Επίσης, η ύπαρξη χλωριούχου νατρίου στο έδαφος αποτελεί ανασταλτικό παράγοντα για την εγκατάσταση ενός αμπελώνα.

Η παραγωγή κρασιών υψηλής ποιότητας προϋποθέτει τη μετριασμένη παραγωγή σταφυλιών από το αμπέλι. Στα πλούσια εδάφη τα αμπέλια αναπτύσσουν πυκνό φύλλωμα και η παραγωγή σταφυλιών είναι αυξημένη, γεγονός που αντίκειται στην παραγωγή ποιοτικών κρασιών. Αντίθετα, στα φτωχά εδάφη η έλλειψη θρεπτικών στοιχείων οδηγεί σε μειωμένη παραγωγή σταφυλιών, από τα οποία όμως παράγονται οίνοι υψηλής ποιότητας. Αυτός είναι και ένας από τους λόγους που κάποιοι αμπελώνες παράγουν ποιοτικότερο κρασί σε σχέση με άλλους αμπελώνες της ίδιας περιοχής.

Κλιματικές απαιτήσεις

Το κλίμα είναι ένας παράγοντας που καθορίζει την καταλληλότητα μιας περιοχής για την εγκατάσταση αμπελώνα. Το αμπέλι δεν ευδοκimeί σε συνθήκες υπερβολικού κρύου αλλά ούτε και υψηλής ζέστης και υγρασίας. Η θερμοκρασία επηρεάζει τη βλάστηση του αμπελιού και την παραγωγή σταφυλιών, από τα οποία προκύπτουν ποιοτικά κρασιά. Η ιδανική θερμοκρασία για τη βλάστηση κυμαίνεται στους 12-18 °C,

για την άνθηση στους 20-22 °C και από την ανθοφορία έως την αλλαγή χρώματος στους 22-26 °C. Η θερμοκρασία που απαιτείται για την αλλαγή του χρωματισμού των ραγών μέχρι την ωρίμανση των σταφυλιών κυμαίνεται στους 20-24 °C και από την έναρξη έως τη λήξη του τρύγου στους 18-22 °C. Οι χαμηλής έντασης άνεμοι ευνοούν την επικονίαση και τη γονιμοποίηση κατά την περίοδο της άνθησης, αλλά οι πολύ ισχυροί άνεμοι είναι καταστροφικοί γιατί σπάζουν τους βλαστούς.

Κλάδεμα

Ως κλάδεμα του αμπελιού ορίζεται η μερική ή ολική αφαίρεση οργάνων του πρέμνου με τομές που γίνονται στον κορμό, στους βλαστούς, στις κληματίδες και στους βραχίονες. Το κλάδεμα επηρεάζει την ανάπτυξη του αμπελιού, εξασφαλίζοντας την ισορροπημένη βλάστηση και συμβάλλοντας στην ποιοτική και ποσοτική απόδοσή του. Υπάρχουν δύο κατηγορίες κλαδέματος, ανάλογα με το βλαστικό στάδιο κατά το οποίο κλαδεύονται τα αμπέλια:

- α. Χειμερινό ή ξηρό κλάδεμα: αφορά στα ξυλοποιημένα όργανα του αμπελιού και αποτελεί την αφαίρεση κληματίδων ή τμημάτων τους και βραχιόνων. Πραγματοποιείται κατά τους χειμερινούς μήνες, πριν την έκπτυξη της βλάστησης, δηλαδή από το Δεκέμβριο μέχρι το Φεβρουάριο, αλλά η ιδανική περίοδος είναι ο Ιανουάριος μέχρι τις αρχές Φεβρουαρίου. Κατά το χειμερινό κλάδεμα κόβονται όλα τα κλαδιά και αφήνονται τρεις ή τέσσερις κληματόβεργες που φέρουν οφθαλμούς (παραγωγικά όργανα). Διακρίνεται σε επιμέρους δύο κατηγορίες, το κλάδεμα διαμόρφωσης και το κλάδεμα καρποφορίας. Το κλάδεμα διαμόρφωσης εφαρμόζεται τα πρώτα 3-4 χρόνια από την εγκατάσταση του αμπελώνα και στόχο έχει την ανάπτυξη και υποστήριξη του βασικού σκελετού των πρέμνων. Το κλάδεμα καρποφορίας αφορά στη ρύθμιση της παραγωγής και του σχήματος του πρέμνου, ανάλογα με τον αριθμό και τη θέση των οφθαλμών που αφήνονται στους παραγωγικούς βλαστούς.
- β. Θερινό ή χλωρό κλάδεμα: υλοποιείται κατά τη διάρκεια της βλαστικής περιόδου, καθώς αφορά σε επεμβάσεις σε χλωρά όργανα και είναι συμπληρωματικό του χειμερινού κλαδέματος. Στοχεύει στην εξισορρόπηση της βλάστησης, στη διόρθωση λαθών που έγιναν κατά το χειμερινό κλάδεμα και στη βελτίωση της ποιότητας των παραγόμενων σταφυλιών. Κύρια στάδια του θερινού κλαδέματος είναι το βλαστολόγημα, το κορυφολόγημα, η αφαίρεση ταχυφυών βλαστών, η χαραγή, το αραίωμα φορτίου και το ξεφύλλισμα.

Γενικά δεν ενδείκνυται το πολύ πρώιμο και το πολύ όψιμο κλάδεμα, καθώς εξασθενούν τα πρέμνα. Επιπλέον, σημαντικό ρόλο για το κλάδεμα διαδραματίζει η ποικιλία του αμπελιού, καθώς και τα χαρακτηριστικά των σταφυλιών και η χρήση για την οποία προορίζονται. Για ποικιλίες που είναι οινοποιήσιμες και απαιτούν μέτρια παραγωγικότητα, ώστε να προκύψουν ποιοτικοί οίνοι, συνιστάται το κυπελλοειδές σχήμα κλαδέματος, ενώ για επιτραπέζιες ποικιλίες το γραμμικό σχήμα.

Άρδευση

Αν και το αμπέλι είναι αρκετά ανθεκτικό στην ξηρασία, για την παραγωγή ποιοτικών σταφυλιών ή μεγάλων ποσοτήτων καρπού είναι αναγκαία η άρδευση, ιδιαίτερα στα ευαίσθητα στάδια της ανάπτυξης, της βλάστησης και της καρποφορίας. Το αμπέλι χρειάζεται μεγάλες ποσότητες νερού για να φέρει σε πέρας τις φυσιολογικές του λειτουργίες (φωτοσύνθεση, αναπνοή, διαπνοή, κ.ά.). Επίσης, το νερό αποτελεί ρυθμιστικό παράγοντα της θερμοκρασίας στα φυτά. Κατά κανόνα, τα φυτά εφοδιάζονται με νερό από το έδαφος σε βάθος 0-60 cm, αλλά επειδή το ενεργό ριζόστρωμα του αμπελιού φτάνει στα 60-80 cm η άρδευση δεν πρέπει να υπερβαίνει αυτό το βάθος. Έλλειψη άρδευσης ή υπερβολικό πότισμα μπορούν να προκαλέσουν βλάβες στα όργανα του πρέμνου. Οι παράγοντες που καθορίζουν την ποσότητα του νερού άρδευσης είναι η ενεργή φυλλική επιφάνεια των πρέμνων, το φορτίο των σταφυλιών και οι κλιματικές συνθήκες. Ενδεικτικά, για την παραγωγή ενός κιλού σταφυλιών από το πρέμνο χρειάζονται περίπου 500-700 λίτρα νερού.

Διάταξη

Η διάταξη και ο προσανατολισμός του αμπελιού είναι σημαντικοί παράγοντες για την ανάπτυξη της καλλιέργειας και εξαρτώνται από την τοποθεσία και το κλίμα της περιοχής. Η φύτευση των πρέμνων ακολουθεί γραμμική διάταξη και οι αποστάσεις φύτευσης εξαρτώνται από τη σύσταση και το βάθος του εδάφους και την ποικιλία του αμπελιού. Η απόσταση μεταξύ των νέων φυτών κυμαίνεται στα 1-2 μέτρα και οι αποστάσεις μεταξύ των γραμμών φύτευσης στα 2-2,5 μέτρα. Σε περιοχές με υψηλή ξηρασία και μικρό βάθος εδάφους οι αποστάσεις είναι μεγαλύτερες.

Τρύγος

Ο τρύγος αποτελεί το τελευταίο στάδιο της αμπελοκομίας και αφορά στο μάζεμα των σταφυλιών. Ο καθορισμός του τρύγου είναι μία σημαντική απόφαση γιατί σχετίζεται άμεσα με την ποιότητα του παραγόμενου οίνου. Η περίοδος του τρύγου εξελίσσεται από τον Αύγουστο έως τον Σεπτέμβριο. Ο καθορισμός της ημερομηνίας του τρύγου εξαρτάται από τη φυσιολογική και τεχνολογική ωριμότητα των σταφυλιών, που διαπιστώνεται μετά από δειγματοληπτικούς ελέγχους στους αμπελώνες. Ο βαθμός ωριμότητας προσδιορίζεται είτε εμπειρικά, είτε με δοκιμή της γεύσης, είτε με χημικές μεθόδους όπως είναι η πυκνομέτρηση, μέθοδος που χρησιμοποιείται για σταφύλια που προορίζονται για οινοποίηση.

Ο πρόωρος τρύγος δίνει κρασιά με χαμηλή περιεκτικότητα σε αλκοόλη, ενώ ο όψιμος τρύγος δίνει κρασιά με υψηλή περιεκτικότητα σε αλκοόλη και χαμηλή οξύτητα. Οι συνθήκες που πρέπει να συντρέχουν για να υλοποιηθεί ο τρύγος είναι οι εξής:

1. Αλλαγή του χρώματος της ρώγας έως την πλήρη ωρίμανση.
2. Μέγιστος όγκος ρώγας.
3. Οι ρώγες να είναι μαλακές και γλυκές.
4. Ο φλοιός των σταφυλιών να είναι διαφανής και να αποσπάται εύκολα.
5. Το τσαμπί να αρχίζει να χάνει το πράσινο χρώμα.

6. Ο μούστος να δείχνει 12,5°-14° Baume (σακχαροπεριεκτικότητα) στις δειγματοληψίες.

Κατά τη συγκομιδή, τα σταφύλια δεν πρέπει να υπόκεινται σε τραυματισμούς γιατί αποτελούν εισόδους για παθογόνους μικροοργανισμούς και έτσι επηρεάζεται η ποιότητα του παραγόμενου κρασιού. Η συγκομιδή πραγματοποιείται τις πρωινές ώρες και σταματάει τις μεσημεριανές, λόγω της φθοράς που υπόκεινται τα σταφύλια αν συγκομιστούν θερμά.

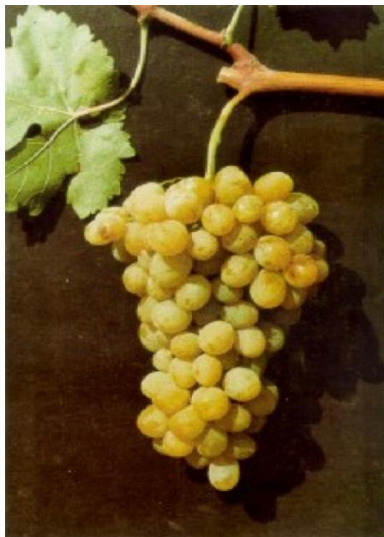
Ποικιλίες

Οι ποικιλίες της αμπέλου διακρίνονται σε τέσσερις κατηγορίες: τις ποικιλίες που προορίζονται για παραγωγή επιτραπέζιων σταφυλιών, αυτές που προορίζονται για παραγωγή κρασιού, αυτές που είναι κατάλληλες για παραγωγή σταφίδας και αυτές που χρησιμεύουν στην παραγωγή χυμών και κονσερβών.

Οι κυριότερες ποικιλίες που καλλιεργούνται στην Ελλάδα για την παραγωγή επιτραπέζιων σταφυλιών είναι οι εξής:

- Ροζακί

Είναι μία από τις σημαντικότερες ποικιλίες για τη παραγωγή σταφυλιών επιτραπέζιας χρήσης. Καλλιεργείται κυρίως στους νομούς Έβρου, Καβάλας, Θεσσαλονίκης, Κορινθίας, Εύβοιας, Λασιθίου, Ηρακλείου, Ρεθύμνου και Χανίων. Η ποικιλία αυτή δίνει ποιοτικότερα σταφύλια σε συνθήκες υψηλής ατμοσφαιρικής και εδαφικής υγρασίας και δροσερού περιβάλλοντος, με αποτέλεσμα την οψίμιση της ωρίμανσης. Η ποικιλία είναι ζωνρή και παραγωγική και προτιμά τα ασβεστολιθικά εδάφη.



Εικόνα 2.1 – Ποικιλία Ροζακί. Πηγή: <http://www.gaiapedia.gr>

- Φράουλα

Καλλιεργείται για πολλά χρόνια στην Ελλάδα, κυρίως στη βόρεια Πελοπόννησο και θεωρείται γηγενής ποικιλία. Είναι έγχρωμη ποικιλία και η παραγωγή της είναι όψιμη (πλήρης ωρίμανση από το δεύτερο δεκαήμερο του Οκτωβρίου). Παρουσιάζει ευαισθησία στις ασθένειες του ωιδίου της αμπέλου και του περονόσπορου. Σε αντίθεση με άλλες ποικιλίες αμπέλου, προτιμά εδάφη πεδινά, χωρίς μεγάλη κλίση και πλούσια σε θρεπτικά στοιχεία.



Εικόνα 2.2 – Ποικιλία Φράουλα. Πηγή: <http://www.gaiapedia.gr>

- Σιδερίτης

Είναι μία ερυθρωπή ποικιλία που καλλιεργείται κυρίως στην Πελοπόννησο και στην Εύβοια. Έχει όψιμη παραγωγή, τα σταφύλια ωριμάζουν μετά το δεύτερο δεκαήμερο του Οκτωβρίου και δίνει τραγανά και δροσερά κρασιά με φρουτώδη και πικάντικα αρώματα και μέτριο αλκοόλ. Τα σταφύλια είναι ανθεκτικά στη συντήρηση για μεγάλο χρονικό διάστημα και αντέχουν στη μεταφορά.



Εικόνα 2.3 – Ποικιλία Σιδερίτης. Πηγή: <http://www.gaiapedia.gr>

- Μοσχάτο Αμβούργου

Καλλιεργείται στις αμπελουργικές περιοχές της Μακεδονίας και της Θεσσαλίας και είναι γνωστό και ως Μοσχάτο μαύρο. Είναι μία ποικιλία ζωνή, που παρουσιάζει μέτρια παραγωγικότητα. Για το λόγο αυτό είναι απαραίτητο να πραγματοποιούνται οι κατάλληλες καλλιεργητικές επεμβάσεις που στοχεύουν στη μείωση της παραγωγής, έτσι ώστε σε συνδυασμό με τις ευνοϊκές εδαφικές και κλιματικές συνθήκες, να βελτιώνεται η ποιότητα των σταφυλιών.



Εικόνα 2.4 – Ποικιλία Μοσχάτο Αμβούργου. Πηγή: <http://www.qaiapedia.gr>

- Αετονύχι άσπρο

Η ποικιλία δεν είναι αρκετά διαδεδομένη, καθώς καλλιεργείται σποραδικά σε ορισμένα σημεία της χώρας. Είναι σχετικά όψιμη ποικιλία, καθώς η πλήρης ωρίμανση ολοκληρώνεται στα μέσα του Σεπτεμβρίου, χαρακτηρίζεται από αυξημένη ζωνρότητα και μέτρια παραγωγικότητα. Είναι ευαίσθητη στον περονόσπορο και στο ωίδιο της αμπέλου. Τα σταφύλια αυτής της ποικιλίας δεν είναι ανθεκτικά στη συντήρηση και δεν ενδείκνυνται για μεταφορά.



Εικόνα 2.5 – Ποικιλία Αετονύχι άσπρο. Πηγή: <http://www.qaiapedia.gr>

- Cardinal

Η καλλιέργεια αυτής της ποικιλίας συναντάται κυρίως στις περιοχές της Θεσσαλονίκης, της Χαλκιδικής, της Λάρισας, της Πιερίας, της Κορινθίας, της Εύβοιας, της Κέρκυρας και της Κρήτης. Είναι η πιο πρώιμη ποικιλία επιτραπέζιων σταφυλιών που καλλιεργείται στην Ελλάδα και εκτείνεται συνολικά σε περίπου 15.000 στρέμματα. Είναι μία ποικιλία ζωνή, που παράγει υψηλής ποιότητας σταφύλια, με ωραία εμφάνιση και ανθεκτικά στη συντήρηση και στη μεταφορά. Στα μειονεκτήματα της ποικιλίας συγκαταλέγονται η ανισορραγία στα πρέμνα και το σχάσιμο των ραγών. Επιπλέον, όταν οι συνθήκες είναι δυσμενείς και το φορτίο των πρέμνων υπερβολικό παρατηρείται και ανομοιομορφία στο χρώμα των σταφυλιών. Τέλος, η ποικιλία είναι ευαίσθητη σε προσβολές από το ωίδιο της αμπέλου.



Εικόνα 2.6 – Ποικιλία Cardinal. Πηγή: <http://www.qaiapedia.gr>

- Όψιμος Έδεσσας

Είναι λευκή ποικιλία αμπέλου που καλλιεργείται κυρίως στις περιοχές της Κεντρικής Μακεδονίας (Έδεσσα, Νάουσα, Χαλκιδική). Χαρακτηρίζεται από υψηλή ζωνρότητα και είναι αρκετά παραγωγική. Είναι όψιμη ποικιλία, με ποιοτικό καρπό και έχει κυρίως τοπικό ενδιαφέρον.



Εικόνα 2.7 – Ποικιλία Όψιμος Έδεσσας. Πηγή: <http://www.qaiapedia.gr>

- Όψιμος Σουφλίου

Η ποικιλία αυτή καλλιεργείται σχεδόν αποκλειστικά στο νομό Έβρου και συγκεκριμένα στην περιοχή του Σουφλίου. Ονομάζεται και Ροζακί Σουφλίου. Είναι λευκή ποικιλία αμπελιού, ζωηρή, αρκετά παραγωγική και όψιμη. Τα παραγόμενα σταφύλια είναι ανθεκτικά στη συντήρηση και στη μεταφορά. Παρουσιάζει τοπικό ενδιαφέρον γιατί αξιοποιεί τις συνθήκες της συγκεκριμένης περιοχής, δηλαδή το μικροκλίμα της και τον τύπο των εδαφών της.



Εικόνα 2.8 – Ποικιλία Όψιμος Σουφλίου. Πηγή: <http://www.qaiapedia.gr>

Οι ποικιλίες που προορίζονται για την παραγωγή του κρασιού διακρίνονται σε αυτές από τις οποίες παράγεται λευκό κρασί και σε αυτές που χρησιμοποιούνται για την παραγωγή ερυθρού κρασιού.

Οι κυριότερες ποικιλίες που καλλιεργούνται στην Ελλάδα για την παραγωγή λευκού οίνου είναι οι εξής:

- Ασύρτικο

Είναι λευκή ελληνική ποικιλία που καλλιεργείται στις Κυκλάδες και κυρίως στη Σαντορίνη. Τα τελευταία χρόνια η καλλιέργεια αυτής της ποικιλίας έχει εξαπλωθεί σε όλη την Ελλάδα, καθώς είναι εύκολα προσαρμόσιμη σε όλους τους τύπους των εδαφών. Είναι ζωηρή και παραγωγική ποικιλία και είναι ανθεκτική στις ασθένειες και στην ξηρασία. Παρουσιάζει μεγάλη αντοχή στις προσβολές του περονόσπορου και του ωιδίου. Η ποικιλία είναι μέσης πρωιμότητας, καθώς ωριμάζει στα τέλη Αυγούστου. Τα ώριμα σταφύλια έχουν υψηλή περιεκτικότητα σε σάκχαρα και παράγουν οίνους με υψηλό αλκοολικό βαθμό, υψηλή οξύτητα και εκλεπτυσμένο άρωμα. Οινοποιείται σε συνδυασμό με άλλες λευκές ποικιλίες για την παραγωγή των κρασιών Νυχτέρι και Βισάντο.



Εικόνα 2.9 – Ποικιλία Ασύρτικο. Πηγή: <http://www.gaiapedia.gr>

- Αθήρι

Είναι μία λευκή ποικιλία με νησιωτικό χαρακτήρα, καθώς συναντάται κυρίως στην Κρήτη και στις Κυκλάδες. Καλλιεργείται στους νομούς Χανίων, Ρεθύμνης, Ηρακλείου, Λασιθίου, Κυκλάδων, Δωδεκανήσου, Χαλκιδικής και Λακωνίας. Είναι μία ζωνρή ποικιλία με πρώιμη παραγωγή. Προσαρμόζεται καλύτερα σε ελαφρά αμμώδη εδάφη που είναι πλούσια σε ανθρακικό ασβέστιο. Λόγω των καλών ιδιοτήτων που έχει η ράγα, τα σταφύλια αυτής της ποικιλίας μπορούν να καταναλωθούν και ως επιτραπέζια. Η ποικιλία είναι ευαίσθητη στο ωίδιο και στο βοτρυτή. Ωριμάζει στα μέσα Αυγούστου και δίνει αρωματικά και φρουτώδη κρασιά, μέτριου αλκοολικού βαθμού και μικρής οξύτητας.



Εικόνα 2.10 – Ποικιλία Αθήρι. Πηγή: <http://www.gaiapedia.gr>

- Μαλαγουζιά

Είναι λευκή ποικιλία που καλλιεργείται στη Μακεδονία (Χαλκιδική, Θεσσαλονίκη), στη Στερεά Ελλάδα (Αττική, Φθιώτιδα, Αιτωλοακαρνανία) και στην Πελοπόννησο. Συνήθως κυκλοφορεί με γεωγραφική ένδειξη παραγωγής, δηλαδή ως τοπικός οίνος των περιοχών της Επανομής, της Σιθωνίας, της Μακεδονίας και της Παλλήνης. Είναι ζωνρή αλλά και παραγωγική ποικιλία, είναι ευαίσθητη στο βοτρυτή και στο ωίδιο και ανθεκτική στην ξηρασία. Ωριμάζει στα τέλη Αυγούστου και κατόπιν προσεκτικής

οινοποίησης δίνει αρωματικά κρασιά, με υψηλό αλκοολικό βαθμό και μέτρια οξύτητα. Η Μαλαγουζιά έχει μεγάλη δυνατότητα παλαίωσης όταν ωριμάζει σε δρύινα βαρέλια.



Εικόνα 2.11 – Ποικιλία Μαλαγουζιά. Πηγή: www.winesofgreece.org

- Μοσχοφίλερο

Ερυθρωπή ποικιλία που παράγει λευκά και ροζέ κρασιά, είναι γνωστή και ως Φιλέρι και καλλιεργείται στους νομούς Ηλείας, Μεσσηνίας και Αρκαδίας (από την οποία προέρχονται οι οίνοι ονομασίας προέλευσης ανωτέρας ποιότητας «Μαντινεία»). Είναι ποικιλία ζωνή και παραγωγική και προσαρμόζεται σε εδάφη μέσης μηχανικής σύστασης, με παρουσία ανθρακικού ασβεστίου και έλλειψη υγρασίας. Παρουσιάζει ευαισθησία στον περονόσπορο, στις ιώσεις και στην ανθόρροια, ιδιαίτερα σε βροχερές συνθήκες κατά την περίοδο της ανθοφορίας ή σε περιπτώσεις όπου τα φυτά εμφανίζουν μεγάλη ζωνρότητα. Ωριμάζει κατά το τρίτο δεκαήμερο του Σεπτεμβρίου έως αρχές Οκτώβρη και δίνει αρωματικά κρασιά με έντονο ανθικό χαρακτήρα, μέτρια οξύτητα και μέτριο έως χαμηλό επίπεδο αλκοόλης.



Εικόνα 2.12 – Ποικιλία Μοσχοφίλερο. Πηγή: www.winesofgreece.org

- Σαββατιανό

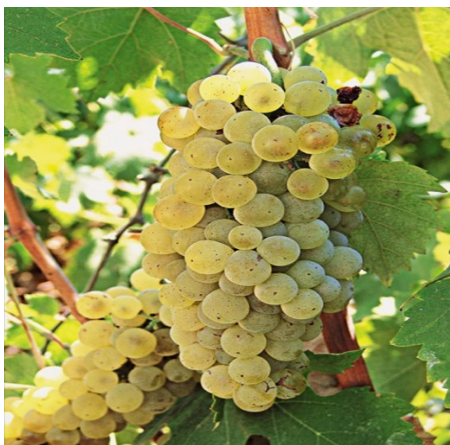
Λευκή ποικιλία που καλλιεργείται στους νομούς Αττικής, Εύβοιας, Βοιωτίας και Μαγνησίας. Είναι η πιο διαδεδομένη οινοποιήσιμη ποικιλία στην Ελλάδα. Είναι ανθεκτική στην ξηρασία και στις ασθένειες της αμπέλου, είναι μέτρια ζωηρή και παραγωγική. Προσαρμόζεται σε εδάφη μέτριας σύστασης, με παρουσία ανθρακικού ασβεστίου. Ωριμάζει στο δεύτερο δεκάημερο του Σεπτεμβρίου και δίνει ξηρά κρασιά υψηλής ποιότητας με αρωματική ένταση, καθώς και το ξηρό κρασί ονομασίας προέλευσης ανωτέρας ποιότητας «Κάντζα».



Εικόνα 2.13 – Ποικιλία Σαββατιανό. Πηγή: <http://www.gaiapedia.gr>

- Ρομπόλα

Λευκή ποικιλία που καλλιεργείται στα νησιά του Ιονίου και κυρίως στην Κεφαλλονιά. Είναι παραγωγική ποικιλία, μέσης ζωηρότητας και μέσης πρωιμότητας, καθώς ωριμάζει στα τέλη Αυγούστου έως αρχές Σεπτεμβρίου. Προτιμάει αμμώδη εδάφη, ελαφράς σύστασης, με παρουσία ανθρακικού ασβεστίου, αλλά μπορεί να αξιοποιήσει και τα φτωχά και ξηρά εδάφη. Είναι ιδιαίτερα ευαίσθητη στις ασθένειες της αμπέλου. Παράγει κρασιά ανώτερης ποιότητας, με ωραίο άρωμα, υψηλό αλκοολικό βαθμό και ισορροπημένη οξύτητα. Σε αυτά συγκαταλέγεται και το κρασί «Ρομπόλα Κεφαλληνίας», που αποτελεί κρασί με Προστατευόμενη Ονομασία Προέλευσης (ΠΟΠ).



Εικόνα 2.14 – Ποικιλία Ρομπόλα. Πηγή: www.winesofgreece.org

- Ροδίτης

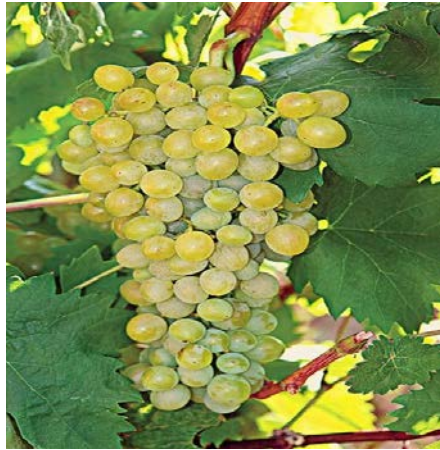
Λευκή ποικιλία με ροζ χρώμα, που καλλιεργείται στους νομούς Μαγνησίας, Αχαΐας, Ηλείας και Μεσσηνίας. Είναι πολύ ζωνή και παραγωγική ποικιλία. Είναι καλλιέργεια που προτιμά το υψόμετρο και τα εδάφη μέσης έως ελαφριάς σύστασης, με παρουσία ασβεστίου. Είναι ευαίσθητη στον περονόσπορο και στην ανθόρροια. Η ωρίμανση των σταφυλιών συντελείται στο δεύτερο και στο τρίτο δεκαήμερο του Σεπτεμβρίου και παράγονται αξιολογά ξηρά και αρωματικά κρασιά, με υψηλή οξύτητα.



Εικόνα 2.15 – Ποικιλία Ροδίτης. Πηγή: <http://www.gaiapedia.gr>

- Αηδάνι

Πρόκειται για λευκή ποικιλία που καλλιεργείται κυρίως στις Κυκλάδες (Σαντορίνη, Πάρο, Νάξο), αλλά και στην Πελοπόννησο και στη Στερεά Ελλάδα. Μπορεί να θεωρηθεί ως αιγαιοπελαγίτικη ποικιλία, γιατί κατέχει ξεχωριστή θέση στην κατηγορία των μεγάλων λευκών κρασιών της Σαντορίνης. Το Αηδάνι χρησιμοποιείται για την παραγωγή ξηρών λευκών κρασιών και σπανιότερα επιδόρπιων οίνων. Τα παραγόμενα κρασιά έχουν απαλό κιτρινοπράσινο χρώμα, μέτρια αλκοόλη και μέτρια οξύτητα. Συνήθως το Αηδάνι αναμειγνύεται με το Ασύρτικο, παρέχοντας αρωματική πολυπλοκότητα στο χαρμάνι, χωρίς να επηρεάζει τον ορυκτώδη χαρακτήρα και την εξαιρετική δομή του τυπικού οίνου ΠΟΠ Σαντορίνης. Τα ξηρά κρασιά από αυτή την ποικιλία μπορούν να καταναλωθούν νέα ή να ακολουθήσουν τη διαδικασία της ωρίμανσης σε φιάλη τουλάχιστον για πέντε χρόνια. Τα επιδόρπια κρασιά της ποικιλίας διατηρούνται για δεκαετίες, καθώς παλαιώνουν για μεγάλο διάστημα σε βαρέλι.



Εικόνα 2.16 – Ποικιλία Αηδάνι. Πηγή: <http://www.qaiapedia.gr>

- Μοσχάτο Σάμου

Λευκή ποικιλία που καλλιεργείται κυρίως στη Σάμο, αλλά και στους νομούς Αχαΐας, Κεφαλληνίας και Δωδεκανήσου. Είναι γνωστή και ως Μοσχάτο άσπρο. Είναι μέτρια ζωνρή ποικιλία, παραγωγική και πρώιμη (η πλήρης ωρίμανση τελείται από τα τέλη Αυγούστου έως το πρώτο δεκαήμερο του Σεπτεμβρίου). Προσαρμόζεται καλύτερα σε ασβεστώδη εδάφη με μέτρια κλίση και μέσο υψόμετρο. Παρουσιάζει ευαισθησία στις περισσότερες ασθένειες της αμπέλου. Παράγει γλυκά κρασιά με δυνατότητα παλαίωσης, αλλά με κατάλληλη περιποίηση μπορεί να δώσει και ξηρά κρασιά με υψηλό αλκοόλ, πλούσια σε άρωμα αλλά ευαίσθητα στην οξείδωση.



Εικόνα 2.17 – Ποικιλία Μοσχάτο Σάμου. Πηγή: www.winesofgreece.org

- Chardonnay

Λευκή ποικιλία που ξεκίνησε να καλλιεργείται στην Αττική και διαδόθηκε σύντομα σε όλη την Ελλάδα. Προσαρμόζεται καλύτερα σε ψυχρές και δροσερές περιοχές, καθώς δεν είναι ανθεκτική στην ξηρασία. Τα περισσότερα ελληνικά κρασιά αυτής της ποικιλίας παρουσιάζουν χαμηλότερο αλκοολικό βαθμό από τα ξένα. Τα κρασιά αυτά

συνήθως ωριμάζουν για δύο έως τρία χρόνια σε δρύινα βαρέλια ή σε φιάλες και κάποια από αυτά αποκτούν πολύπλοκη αρωματική δομή.



Εικόνα 2.18 – Ποικιλία Chardonnay. Πηγή: www.winewayoranother.gr

- Sauvignon Blanc

Λευκή ποικιλία με μεγάλη επίδραση στον ελληνικό αμπελώνα. Αρχικά καλλιεργήθηκε στην περιοχή της Μακεδονίας και συνδυάστηκε με άλλες ποικιλίες, προσδίδοντας σε αυτές μοναδικά αρωματικά χαρακτηριστικά και υψηλή οξύτητα. Τα κρασιά αυτής της ποικιλίας καταναλώνονται είτε φρέσκα είτε μετά από ωρίμανση σε δρύινα βαρέλια. Τα φρέσκα κρασιά έχουν φρουτώδες άρωμα, ενώ τα παλαιωμένα εμφανίζουν πιο πυκνή γεύση.



Εικόνα 2.19 – Ποικιλία Sauvignon Blanc. Πηγή: www.wikipedia.org

- Viognier

Λευκή ποικιλία που ευδοκimeί στις πιο δροσερές περιοχές της Ελλάδας. Η καλλιέργειά της δεν είναι ιδιαίτερα διαδεδομένη στη χώρα και οι αποδόσεις της είναι χαμηλές. Η συγκομιδή των σταφυλιών γίνεται από τα τέλη Αυγούστου έως τις αρχές Σεπτεμβρίου

και δίνουν κρασιά υψηλής ποιότητας, που συνήθως ακολουθούν τη διαδικασία της ωρίμανσης.



Εικόνα 2.20 – Ποικιλία Viognier. Πηγή: www.wikipedia.org

- Riesling

Λευκή ποικιλία γερμανικής προέλευσης, στην Ελλάδα καλλιεργείται στους νομούς Γρεβενών και Κοζάνης. Είναι όψιμη ποικιλία, ωριμάζει το τρίτο δεκαήμερο του Σεπτεμβρίου, μέτριας ζωηρότητας και παραγωγικότητας. Είναι ανθεκτική στην ξηρασία και ευαίσθητη στους ανοιξιάτικους παγετούς και στις ασθένειες ωίδιο και περονόσπορο. Δίνει κρασιά υψηλής ποιότητας με χαρακτηριστικό άρωμα.



Εικόνα 2.21 – Ποικιλία Riesling. Πηγή: <http://www.gaiapedia.gr>

Οι κυριότερες ποικιλίες που καλλιεργούνται στην Ελλάδα για την παραγωγή κόκκινου κρασιού είναι οι ακόλουθες:

- Αγιωργίτικο

Ερυθρή ελληνική ποικιλία που καλλιεργείται κυρίως στην αμπελουργική ζώνη της Νεμέας (περιοχή ονομασίας προέλευσης ανώτερης ποιότητας), καθώς και στους νομούς Αρκαδίας, Αργολίδας και Αττικής. Προσαρμόζεται καλύτερα σε μέσης μηχανικής σύστασης εδάφη, καλώς αποστραγγιζόμενα, αυξημένης γονιμότητας, που βρίσκονται σε κάποιο υψόμετρο. Είναι ποικιλία μέτριας ζωηρότητας και υψηλής παραγωγικότητας, επομένως εφαρμόζεται αυστηρό κλάδεμα. Παρουσιάζει

ευαισθησία στην ασθένεια του ωιδίου και μέτρια ευαισθησία στον περονόσπορο. Η ποικιλία ωριμάζει στα τέλη Σεπτεμβρίου. Ανάλογα με το υψόμετρο φύτευσης, η ποικιλία δίνει διαφορετικά οινικά προϊόντα. Σε χαμηλά υψόμετρα δίνει επιδόρπιους γλυκούς οίνους, σε μέτρια υψόμετρα δίνει ξηρά κρασιά υψηλού αλκοολικού βαθμού και σε μεγάλα υψόμετρα δίνει ροζέ κρασιά.



Εικόνα 2.22 – Ποικιλία Αγιωργίτικο. Πηγή: www.winesofgreece.org

- Κοτσιφάλι

Ερυθρή ποικιλία που καλλιεργείται στους νομούς Ηρακλείου, Λασηθίου, Ρεθύμνου και Χανίων, καθώς προσαρμόζεται εύκολα στις εδαφοκλιματικές συνθήκες της Κρήτης. Είναι παραγωγική ποικιλία, με πρώιμη ωρίμανση (από τα μέσα Αυγούστου). Από τη συγκεκριμένη ποικιλία παράγονται εξαιρετικής ποιότητας κρασιά, συνήθως μετά από ανάμειξη με την ποικιλία Μανδηλαριά. Τα πιο γνωστά από αυτά είναι οι ερυθροί ξηροί οίνοι ΠΟΠ «Πεζά» και ΠΟΠ «Αρχάνες».



Εικόνα 2.23 – Ποικιλία Κοτσιφάλι. Πηγή: <http://www.gaiapedia.gr>

- Μανδηλαριά

Ερυθρή ποικιλία που καλλιεργείται κυρίως στις περιοχές των Κυκλάδων, Δωδεκανήσου, Λασηθίου, Ηρακλείου, Ρεθύμνου και Χανίων. Είναι παραγωγική και μέσης πρωιμότητας ποικιλία, καθώς ωριμάζει από αρχές Σεπτεμβρίου. Χαρακτηριστικό

γνώρισμα της ποικιλίας είναι η υψηλή περιεκτικότητα των ραγών σε ταννίνες και χρωστικές. Η Μανδηλαριά είναι μία από τις πιο πλούσιες σε χρώμα ερυθρές ποικιλίες, για αυτό το λόγο χρησιμοποιείται για την ενίσχυση του χρώματος άλλων ποικιλιών, όπως το Κοτσιφάλι, το Αθήρι και το Ασύρτικο.



Εικόνα 2.24 – Ποικιλία Μανδηλαριά. Πηγή: www.winesofgreece.org

- Μαυροδάφνη

Ερυθρή ποικιλία που καλλιεργείται κυρίως στο νομό Αχαΐας και σε πιο περιορισμένες εκτάσεις στα Επτάνησα και στη Χαλκιδική. Χαρακτηρίζεται από μέτρια ζωηρότητα και μεγάλη παραγωγικότητα, επομένως εφαρμόζεται σε αυτή αυστηρό κλάδεμα. Παρουσιάζει ευαισθησία στην ασθένεια του περονόσπορου και του ωιδίου κι επίσης είναι ευαίσθητη στην ξηρασία. Η πλήρης ωρίμανση επέρχεται το πρώτο δεκαπενθήμερο του Σεπτεμβρίου. Παράγει κυρίως γλυκά κρασιά, όπως το ΠΟΠ Μαυροδάφνη Πατρών και το ΠΟΠ Μαυροδάφνη Κεφαλλονιάς, αλλά μπορεί να δώσει και ξηρά κρασιά υψηλού αλκοολικού βαθμού.



Εικόνα 2.25 – Ποικιλία Μαυροδάφνη. Πηγή: www.winesofgreece.org

- Νεγκόσκα

Ερυθρή ποικιλία που καλλιεργείται στη Δυτική και Κεντρική Μακεδονία. Χαρακτηρίζεται από υψηλή ζωηρότητα και παραγωγικότητα και επιδέχεται αυστηρού κλαδέματος. Παρουσιάζει ευαισθησία στον περονόσπορο, αλλά είναι

ανθεκτική στην ξηρασία. Ωριμάζει στα τέλη Σεπτεμβρίου και δίνει κρασιά υψηλού αλκοολικού βαθμού, με μέτρια οξύτητα και μέτριες ταννίνες και έντονο χρώμα.



Εικόνα 2.26 – Ποικιλία Νεγκόσκα. Πηγή: www.winesofgreece.org

- Ξινόμαυρο

Ερυθρή ποικιλία που καλλιεργείται ευρέως στη Βόρεια Ελλάδα, κυρίως στις περιοχές της Νάουσας, της Γουμένισσας, του Αμύνταιου και της Ραψάνης. Είναι πολύ ζωντανή και παραγωγική ποικιλία και δέχεται αυστηρό κλάδεμα. Προσαρμόζεται καλύτερα σε μέσης μηχανικής σύστασης εδάφη, καλώς αποστραγγιζόμενα, με παρουσία ασβεστίου. Έχει υψηλές απαιτήσεις σε κάλιο, το οποίο συμβάλλει στην καλύτερη ωρίμανση των σταφυλιών και στην παραγωγή ποιοτικότερου οίνου. Η ποικιλία είναι ευαίσθητη στην ξηρασία και στις ασθένειες του ωιδίου, του περονόσπορου και του βοτρυτή. Ωριμάζει στα τέλη Σεπτεμβρίου και δίνει διάφορους τύπους κρασιών ανάλογα με τις εδαφοκλιματικές συνθήκες της καλλιέργειας, το υψόμετρο και το παραγόμενο φορτίο ανά πρέμνο (κίλα σταφυλιών ανά φυτό). Επομένως, παράγονται κόκκινα κρασιά με δυνατότητα παλαίωσης ή φρέσκα αρωματικά ροζέ και αφρώδη κρασιά.



Εικόνα 2.27 – Ποικιλία Ξινόμαυρο. Πηγή: www.winesofgreece.org

- Cabernet Sauvignon

Ερυθρή ποικιλία που προέρχεται από τη Γαλλία και καλλιεργείται σποραδικά σε όλη την Ελλάδα. Συναντάται κυρίως στους νομούς Χαλκιδικής, Κοζάνης, Γρεβενών, Ιωαννίνων, Αχαΐας και Μεσσηνίας. Είναι ζωντανή και μέτριας παραγωγικότητας ποικιλία. Προσαρμόζεται σε μέσης μηχανικής σύστασης εδάφη, βαθιά και μέτρια

γόνιμα και έχει μεγάλες ανάγκες σε άρδευση. Παρουσιάζει ευαισθησία στο ωίδιο και στις ασθένειες του ξύλου, καθώς και στην ξηρασία. Ωριμάζει πλήρως στα μέσα Σεπτεμβρίου και δίνει κρασιά υψηλού αλκοολικού βαθμού, με έντονο χρώμα και δυνατό άρωμα.



Εικόνα 2.28 – Ποικιλία Cabernet Sauvignon. Πηγή: www.winewayoranother.gr

- Merlot

Ερυθρή ποικιλία με γαλλική προέλευση, που είναι αρκετά διαδεδομένη σε όλη την Ελλάδα. Συναντάται κυρίως στους νομούς Κοζάνης, Φλώρινας, Γρεβενών, Λευκάδας, Ηλείας, Αχαΐας, Μεσσηνίας και Αρκαδίας. Είναι ζωηρή, μέτρια παραγωγική και σχετικά πρώιμη. Προτιμά εδάφη μέσης μηχανικής σύστασης, βαθιά, που βρίσκονται σε υψόμετρο. Επιδέχεται αυστηρό κλάδεμα και έχει υψηλές ανάγκες άρδευσης για να παράγει ποιοτικό καρπό. Παρουσιάζει ευαισθησία στο ωίδιο, στον περονόσπορο και στον ανοιξιάτικο παγετό. Επιπλέον, εμφανίζει ανθόρροια και ανισορραγία λόγω υπερβολικής ζωηρότητας των φυτών ή λόγω των βροχών και του παγετού κατά τη διάρκεια της άνοιξης. Ωριμάζει στα τέλη του Αυγούστου και δίνει κρασιά υψηλού αλκοολικού βαθμού και υψηλής οξύτητας, με έντονο χρώμα και δυνατό άρωμα.



Εικόνα 2.29 – Ποικιλία Merlot. Πηγή: en.wikipedia.org

- Syrah

Ερυθρή ποικιλία γαλλικής προέλευσης που καλλιεργείται στις περιοχές της Μακεδονίας, της Θράκης, της Θεσσαλίας, της Πελοποννήσου και της Κρήτης. Είναι πρώιμη και ζωνήρη ποικιλία, αρκετά παραγωγική. Προσαρμόζεται καλύτερα σε βαθιά εδάφη, όξινα και σχιστολιθικά. Παρουσιάζει ευαισθησία στον περονόσπορο και στο βοτρυτή, καθώς και στους ανοιξιάτικους παγετούς. Ωριμάζει το πρώτο δεκαπενθήμερο του Σεπτεμβρίου και δίνει κρασιά υψηλού αλκοολικού βαθμού, μέτριας έως υψηλής οξύτητας, πλούσια σε ταννίνες με έντονο χρώμα και πλούσιο άρωμα.



Εικόνα 2.30 – Ποικιλία Syrah. Πηγή: www.winetraveler.com

- Pinot Noir

Ερυθρή ποικιλία γαλλικής προέλευσης, που καλλιεργείται κυρίως στις περιοχές της Πελοποννήσου, της Στερεάς Ελλάδας, της Ηπείρου, της Δυτικής και Κεντρικής Μακεδονίας. Είναι πρώιμη ποικιλία, μέτριας ζωνρότητας και παραγωγικότητας. Προσαρμόζεται καλύτερα σε δροσερά και ασβεστούχα εδάφη. Η πλήρης ωρίμανση επέρχεται το δεύτερο δεκάημερο του Αυγούστου.



Εικόνα 2.31 – Ποικιλία Pinot Noir. Πηγή: <http://www.gaiapedia.gr>

2.2 Γεωργία και Αμπελουργία Ακριβείας

Η Γεωργία Ακριβείας (Precision Agriculture) αποτελεί ένα σύστημα παραγωγής αγροτικών προϊόντων που στηρίζεται στη διαχείριση των εισροών σε μία καλλιέργεια με βάση την παραλλακτικότητα που παρουσιάζει, τόσο χωρικά όσο και χρονικά. Τα συμβατικά συστήματα διαχείρισης των καλλιεργειών αντιμετωπίζουν τον αγρό ως μία ομοιομορφή οντότητα και οι εισροές παρέχονται με ενιαίο τρόπο, θεωρώντας ότι υπάρχει ομοιογένεια στις εδαφολογικές ιδιότητες, την υγρασία και τη γονιμότητα του εδάφους, την ανάπτυξη των φυτών, τους πληθυσμούς των εντόμων και την κλίση και το βάθος του εδάφους. Αντίθετα, τα συστήματα της γεωργίας ακριβείας στηρίζονται στις δυνατότητες που παρέχουν οι νέες τεχνολογίες για την αναγνώριση της χωρικής και της χρονικής παραλλακτικότητας των καλλιεργητικών αναγκών και την ανάπτυξη συστημάτων μεταβλητών παροχών των εισροών. Επομένως, η βασική αρχή της Γεωργίας Ακριβείας είναι η διαχείριση του αγρού με βάση ζώνες διαχείρισης (management zones), δηλαδή μικρότερες περιοχές που εμφανίζουν ομοιομορφία, καθώς έχουν κοινά εδαφολογικά και αγρονομικά χαρακτηριστικά και ανταποκρίνονται περισσότερο στην πραγματικότητα.

Η Αμπελουργία Ακριβείας (Precision Viticulture) εντάσσεται στις πρακτικές της Γεωργίας Ακριβείας (Precision Agriculture) με στόχο την ορθότερη διαχείριση της καλλιέργειας αμπέλου. Η υγεία και η παραγωγικότητα των αμπελιών (*Vitis Vinifera*) επηρεάζεται από πληθώρα φυσικών, χημικών και βιολογικών παραγόντων, καθώς και από τις χωρικές διακυμάνσεις στην τοπογραφία, τα χαρακτηριστικά του εδάφους και τη συχνότητα εμφάνισης προσβολών από ασθένειες και παράσιτα. Η διακύμανση αυτών των παραγόντων, έχει σαν αποτέλεσμα τη χωρική διακύμανση στην απόδοση της παραγωγής των πρέμνων και στην ποιότητα των σταφυλιών μέσα στο ίδιο τεμάχιο, που τις περισσότερες φορές οδηγεί σε συνολική μείωση της ποιότητας και της ποσότητας του παραγόμενου οίνου και κατά συνέπεια σε μείωση των οικονομικών εσόδων για τους παραγωγούς (Hall et al., 2003). Κύριοι στόχοι της Αμπελουργίας Ακριβείας είναι η ορθολογική χρήση των εισροών, της κατανάλωσης ενέργειας και των φυσικών πόρων, η αύξηση της απόδοσης των πρέμνων και η μείωση του κόστους της καλλιέργειας. Πιο συγκεκριμένα, στοχεύει στη διαχείριση των προαναφερθέντων διακυμάνσεων στην καλλιέργεια αμπέλου σε συνδυασμό με την αύξηση των οικονομικών εσόδων και τη μείωση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων (Arnó et al., 2009).

Η Αμπελουργία Ακριβείας αποτελεί μία συνεχή κυκλική διαδικασία (Bramley et al., 2003) που περιλαμβάνει τα εξής στάδια:

- τη συλλογή δεδομένων για τον αμπελώνα,
- την ανάλυση των δεδομένων,
- τη δημιουργία και το σχεδιασμό διαφορετικών ζωνών διαχείρισης και
- την εφαρμογή στοχευμένων καλλιεργητικών φροντίδων για κάθε ζώνη, ανάλογα τις πραγματικές της ανάγκες.

Για την εφαρμογή των παραπάνω τεχνικών της αμπελουργίας ακριβείας αξιοποιούνται ποικίλα τεχνολογικά μέσα, όπως είναι οι αισθητήρες παρακολούθησης και καταγραφής της απόδοσης της παραγωγής (crop sensors – yield monitors), οι επίγειοι και τηλεπισκοπικοί αισθητήρες, τα δορυφορικά και εναέρια δεδομένα, τα γεωγραφικά συστήματα πληροφοριών (GIS), το παγκόσμιο σύστημα εντοπισμού (GPS) και συστήματα για την επεξεργασία, ανάλυση και ερμηνεία των δεδομένων.

Η συλλογή δεδομένων από τις παραπάνω πηγές και η επεξεργασία τους οδηγούν στον καθορισμό των ζωνών διαχείρισης, το πλήθος των οποίων είναι ανάλογο του μεγέθους και της παραλλακτικότητας του αμπελώνα. Τα κύρια χαρακτηριστικά των ζωνών διαχείρισης είναι η σταθερότητα στο χρόνο, η ευκολία στην οριοθέτηση και διαχείριση και η συσχέτιση με σημαντικές ποσοτικές και ποιοτικές παραμέτρους της καλλιέργειας. Αποτέλεσμα της διαφοροποιημένης διαχείρισης κάθε ζώνης είναι η εξομάλυνση της υπάρχουσας παραλλακτικότητας, παρέχοντας μεταβλητές εισροές άρδευσης, λίπανσης και φυτοπροστασίας, καθώς και ο επιλεκτικός τρύγος, που συνεισφέρει στην παραγωγή ποιοτικότερων οίνων.

Τα τελευταία χρόνια οι τεχνικές της αμπελουργίας ακριβείας διαδίδονται ευρέως στον τομέα της καλλιέργειας αμπέλου σε όλο τον κόσμο. Παρατηρείται έντονο επιστημονικό ενδιαφέρον για αυτό τον τομέα σε κατεχοχήν οινοπαραγωγικές χώρες της Ευρώπης (Γαλλία, Ιταλία, Ισπανία, Ελλάδα), στις Η.Π.Α., στην Αυστραλία, στον Καναδά και στη Χιλή. Σε αυτές τις χώρες η υιοθέτηση των επιστημονικών και τεχνολογικών εξελίξεων διαδίδεται ολοένα και περισσότερο, καθώς ειδικά για μεγάλες επιχειρήσεις παραγωγής κρασιού το οικονομικό όφελος είναι αξιοσημείωτο.

Οι πρώτες βιβλιογραφικές αναφορές περιλαμβάνουν εφαρμογές στις Η.Π.Α. (Wample et al., 1999), όπου έγινε η πρώτη εφαρμογή αισθητήρα παραγωγής σε τρυγητική μηχανή, καθώς και στην Αυστραλία (Bramley and Proffitt, 1999). Τα επόμενα χρόνια πολλές εταιρίες και οργανισμοί που ασχολούνταν με τη γεωργία ακριβείας, ανέπτυξαν ενδιαφέρον για την αμπελουργία ακριβείας, τάση που ενισχύθηκε μετά την είσοδο στην αγορά συσκευών που επέτρεπαν την παρακολούθηση και καταγραφή της απόδοσης παραγωγής (yield monitors) (Tagarakis et al., 2012). Η διακύμανση της απόδοσης της παραγωγής αποτέλεσε αντικείμενο μελέτης για έρευνες στη Γαλλία, την Ισπανία, τη Χιλή και την Ελλάδα (Tisseyre et al., 2001; Ortega et al., 2003; Arnó et al., 2005; Tagarakis et al., 2006; Tagarakis et al., 2012). Οι χάρτες απόδοσης παραγωγής και μετέπειτα οι ζώνες διαχείρισης μπορούν να σχηματιστούν με μετρήσεις βασισμένες στο έδαφος (Tagarakis et al., 2012). Η "χαρτογράφηση" (mapping) της ηλεκτρικής αγωγιμότητας του εδάφους (ECa) έχει χρησιμοποιηθεί σε πολλές εργασίες και ερευνητικές μελέτες για το σχεδιασμό ζωνών διαχείρισης (Kitchen et al., 2005; Molin & Castro, 2008; Moral et al., 2010), και κάποιες φορές συνδυασμένη με χάρτες υψομέτρου με χρήση RTK-GPS (Fridgen et al., 2004; Schepers et al., 2004).

Εκτός από τις μετρήσεις εδάφους, τα χαρακτηριστικά της κόμης φυλλώματος, η οποία μπορεί να μελετηθεί τηλεπισκοπικά, μπορούν να λειτουργήσουν ως ένας καλός

δείκτης της απόδοσης παραγωγής και της ποιότητας του σταφυλιού (Hall et al., 2011). Οι Zarco-Tejada et al. (2005) ανέπτυξαν μεθόδους παρακολούθησης της φυσιολογικής κατάστασης του αμπελιού, μέσω ακριβών εκτιμήσεων στα επίπεδα χλωροφύλλης, αξιοποιώντας, μεταξύ άλλων, δείκτες βλάστησης όπως ο TCARI (Transformed Cab Absorption in Reflectance Index) και ο OSAVI (Optimised Soil-Adjusted Vegetation Index). Ανάμεσα στους δείκτες βλάστησης ο περισσότερο χρησιμοποιούμενος είναι ο NDVI (Normalized Difference Vegetation Index), καθώς σχετίζεται με τις ιδιότητες της κόμης φυλλώματος (canopy) όπως είναι η περιεκτικότητα χλωροφύλλης, η συνολική βιομάζα και η έκταση φυλλώματος (Hansen & Schjoerring, 2003), με την απόδοση παραγωγής, και επίσης με τα επίπεδα νερού, τα χαρακτηριστικά φρούτων και τελικά την ποιότητα του κρασιού (Johnson et al., 2003).

Τα κύρια πεδία μελέτης στην Αμπελουργία Ακριβείας που πλέον απασχολούν την επιστημονική κοινότητα είναι ο ακριβής χωρικός εντοπισμός των καλλιεργειών, η «χαρτογράφηση» της απόδοσης της παραγωγής των αμπελώνων, των ιδιοτήτων εδάφους και των ασθενειών του αμπελιού, καθώς και η μελέτη των διαφορετικών ιδιοτήτων των ποικιλιών, των αρδευτικών αναγκών και της ποικιλομορφίας των εδαφοκλιματικών παραγόντων. Στην πρόοδο αυτή συμβάλλει η συνεχής ανάπτυξη τηλεπισκοπικών εφαρμογών για την Αμπελουργία Ακριβείας.

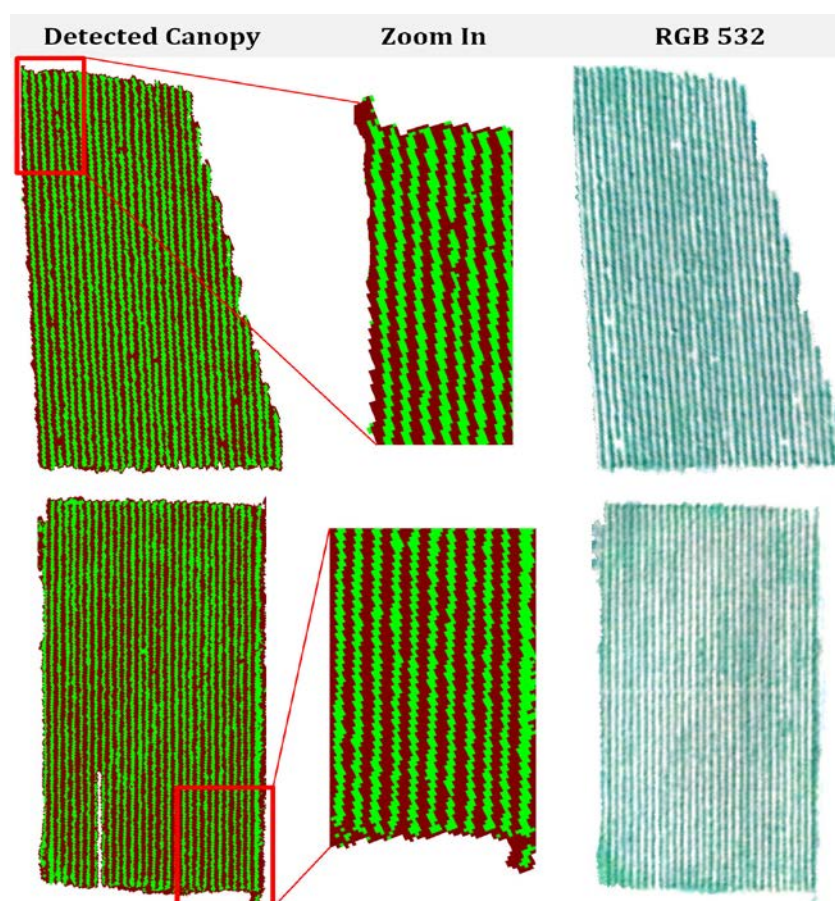
2.3 Τηλεπισκοπικά Δεδομένα και Τεχνικές Ανίχνευσης Φυλλώματος

Η Τηλεπισκόπηση χρησιμοποιείται ως μέσο εντοπισμού των καλλιεργειών και παρακολούθησης της ανάπτυξης τους. Οι πολυφασματικοί και υπερφασματικοί δέκτες προσαρτημένοι σε δορυφορικές, εναέριες και UAV πλατφόρμες είναι σήμερα η κύρια πηγή δεδομένων για τη γεωργία ακριβείας. Ακολουθώντας, παρουσιάζονται κάποιες ερευνητικές εργασίες που ασχολήθηκαν με τεχνικές ανίχνευσης φυλλώματος σε αμπέλια με χρήση τηλεπισκοπικών δεδομένων.

Οι Nolan et al. (2015) πρότειναν μία μεθοδολογία εντοπισμού των γραμμών φύτευσης των αμπελιών με χρήση τεχνικών σκελετοποίησης (skeletonisation), με σκοπό να μειωθεί η πολυπλοκότητα της σκηνής της εικόνας και να απομονωθούν τα αμπέλια από το ενδιαμέσο έδαφος. Εφαρμόζοντας μία σειρά γεωμετρικών και χωρικών κανονισμών, ο αλγόριθμος εντόπισε κάθε γραμμή φύτευσης ξεχωριστά. Ο προτεινόμενος αλγόριθμος εφαρμόστηκε σε υψηλής ανάλυσης εικόνες που προέρχονταν από Μη Επανδρωμένα Αεροσκάφη (UAVs). Η διαδικασία που ακολουθήθηκε περιλάμβανε τα εξής στάδια: α) Φιλτράρισμα Ιστογράμματος (για τη δημιουργία μίας δυαδικής μάσκας που να απεικονίζει τα πιθανά εικονοστοιχεία αμπελιού), β) Σκελετοποίηση (για τη δημιουργία ενός γεωμετρικού προτύπου για κάθε αντικείμενο), γ) Εντοπισμό των γραμμών φύτευσης των αμπελιών (χρησιμοποιώντας γεωμετρικά και φασματικά χαρακτηριστικά με τη μέθοδο του Εγγύτερου Γείτονα για τη δημιουργία ομάδων αμπελιών). Αυτή η διαδικασία ήταν μη επιβλεπόμενη και επαναλαμβανόμενη, μέχρι να προκύψει η τελική ταξινόμηση. Η ποσοτική αξιολόγηση των αποτελεσμάτων που προέκυψαν από εφαρμογή της μεθοδολογίας σε αεροφωτογραφίες υψηλής ανάλυσης ενός αμπελώνα 30 εκταρίων

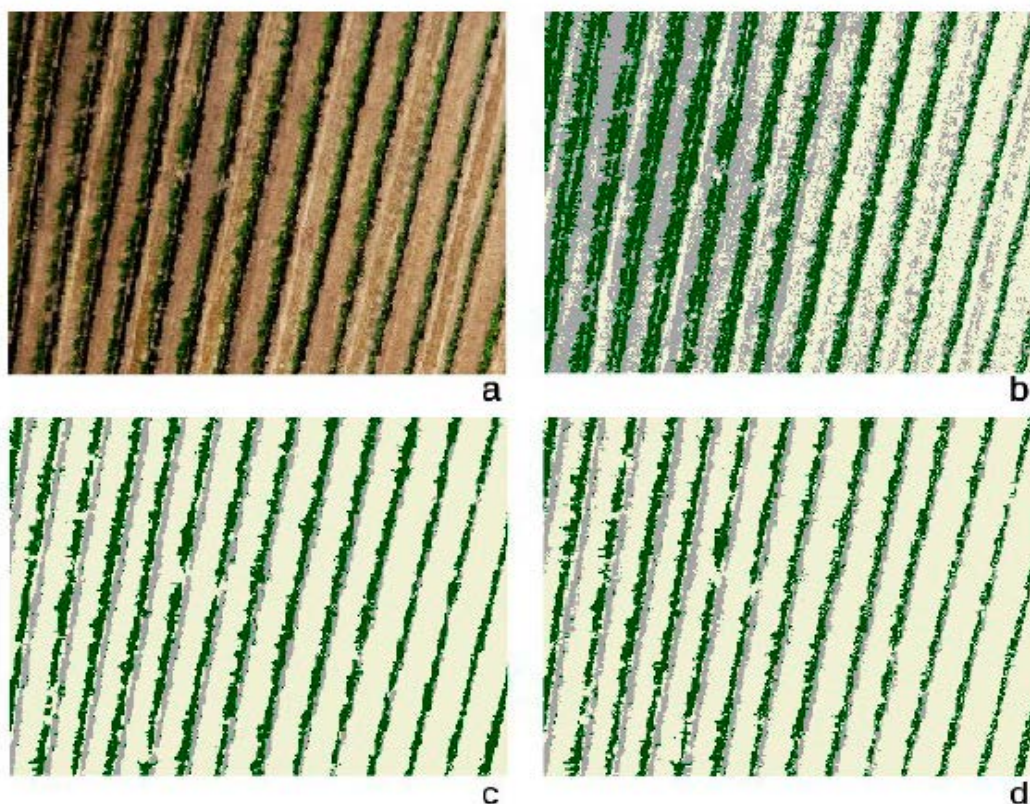
κατέδειξαν την αποτελεσματικότητα της προτεινόμενης μεθόδου με υψηλές τιμές ακρίβειας-precision (0,971) και ευαισθησίας-sensitivity (0,971).

Οι Karakizi et al. (2016) πρότειναν ένα σύστημα ταξινόμησης βασιζόμενο στην αντικειμενοστραφή ανάλυση εικόνας (object-based classification framework) για τον εντοπισμό του φυλλώματος των αμπελιών σε πολύ υψηλής ανάλυσης πολυφασματικά δεδομένα. Για τις ανάγκες της ταξινόμησης χρησιμοποιήθηκαν φασματικά και χωρικά δεδομένα, καθώς και χαρακτηριστικά της υφής (π.χ. μέσος όρος των τιμών των 8 πολυφασματικών καναλιών, NDVI, τυπική απόκλιση GLCM) για τέσσερις πολυφασματικές εικόνες που προέρχονταν από το δορυφορικό αισθητήρα WorldView-2. Επιπλέον, συμπεριλήφθηκαν δεδομένα ανακλαστικότητας που συλλέχθηκαν με φασματογράφο χειρός στο πεδίο. Η ποσοτική αξιολόγηση κατέδειξε ότι η μεθοδολογία εντοπισμού του φυλλώματος των αμπελώνων είναι αρκετά αποτελεσματική, με την Ολική Ακρίβεια να υπερβαίνει το 96% σε όλα τα πειράματα. Στη συνέχεια, υλοποιήθηκε ταξινόμηση των εικόνων και με τον αλγόριθμο SVM (Μέση Ολική Ακρίβεια = 95,9%) και από τη σύγκριση των δύο μεθοδολογιών προέκυψε ότι ο εντοπισμός της κόμης των αμπελιών επιτυγχάνεται καλύτερα με την αντικειμενοστραφή ανάλυση εικόνας (Μέση Ολική Ακρίβεια = 98,2%).



Εικόνα 2.32. Αποτέλεσμα ταξινόμησης με αντικειμενοστραφή ανάλυση. Αριστερά: Εντοπισμένο φύλλωμα αμπελιών (πράσινο χρώμα) και ενδιαμέσο έδαφος (καφέ χρώμα). Δεξιά: φυσικό έγχρωμο σύνθετο.

Οι Poblete-Echeverría et al. (2017) ερεύνησαν τον εντοπισμό του φυλλώματος σε αμπελώνες με χρήση εικόνων RGB πολύ υψηλής χωρικής ανάλυσης που προέρχονταν από Μη Επανδρωμένα Εναέρια Οχήματα (UAVs). Στόχος της εργασίας ήταν η σύγκριση της εφαρμογής τεσσάρων μεθόδων ταξινόμησης: K-means, Νευρωνικά Δίκτυα (Artificial Neural Networks – ANN), Random Forest και Φασματικοί Δείκτες (Spectral Indices) στον εντοπισμό του φυλλώματος σε αμπελία. Τα δεδομένα προέρχονταν από έξι πτήσεις που υλοποιήθηκαν από τα πρώιμα στάδια της καλλιέργειας έως τον τρύγο σε αμπελώνες στην κοιλάδα San Clemente, στη Χιλή. Τα πειράματα υλοποιήθηκαν για τρεις κατηγορίες ταξινόμησης: Φύλλωμα αμπελιού (Vine canopy), Έδαφος (Soil), Σκιά αμπελιών (Shadow). Τα αποτελέσματα της εργασίας κατέδειξαν ότι οι μέθοδοι των Νευρωνικών Δικτύων και των Φασματικών Δεικτών ήταν οι πιο αποτελεσματικές στον εντοπισμό της κόμης των αμπελιών, με πολύ υψηλή Ολική Ακρίβεια για τα δεδομένα από όλα τα στάδια της καλλιέργειας. Η μέθοδος των Φασματικών Δεικτών επέφερε την πιο επιτυχή ταξινόμηση για την κατηγορία Φύλλωμα αμπελιού (Vine canopy), με την Ολική Ακρίβεια να ανέρχεται στο 99%, αλλά να αστοχεί στην ορθή ταξινόμηση των άλλων δύο κατηγοριών. Τα πιο επιτυχή αποτελέσματα ταξινόμησης και για τις τρεις κατηγορίες προέκυψαν όταν οι τιμές των φασματικών δεικτών χρησιμοποιήθηκαν ως δεδομένα εισόδου για την εκπαίδευση των αλγορίθμων των Νευρωνικών Δικτύων και του Random Forest, όπου η Ολική Ακρίβεια ανέρχεται στο 98%.



Εικόνα 2.33. Αποτελέσματα ταξινόμησης για τις τρεις μεθόδους. α) Αρχική εικόνα, β) Αποτέλεσμα K-means, γ) Αποτέλεσμα Νευρωνικών Δικτύων, δ) Αποτέλεσμα Random Forest.

Οι Sinat et al. (2019) χρησιμοποίησαν εικόνες από Μη Επανδρωμένα Αεροσκάφη (UAVs) και εφάρμοσαν μη επιβλεπόμενες μεθόδους ταξινόμησης για τον εντοπισμό του φυλλώματος σε αμπέλια και το διαχωρισμό του από το ενδιάμεσο έδαφος, από άλλα φυτά και σκιές. Οι προτεινόμενοι μέθοδοι μη επιβλεπόμενης ταξινόμησης είναι οι εξής: HSV-based (Hue, Saturation, Value), DEM (Digital Elevation Model) και K-means. Οι ταξινομήσεις εφαρμόστηκαν σε δύο σύνολα εικόνων που προήλθαν από δύο αμπελώνες για τις χρονιές 2017 και 2018 και φέρουν τα κανάλια RGB (Red-Green-Blue) και NRG (Near Infrared-Red-Green) αντίστοιχα. Για τις εικόνες RGB, ο HSV-based αλγόριθμος υπερεκτιμά τα αμπέλια, ενώ στις NRG εικόνες ο HSV είναι ο πιο σταθερός αλγόριθμος και το μοντέλο DEM υπερεκτιμά ελαφρώς τα αμπέλια. Επιπλέον, παρατηρήθηκε ότι ο αλγόριθμος K-means απαιτεί μεγαλύτερη υπολογιστική ισχύ σε σχέση με τους άλλους δύο αλγορίθμους. Συμπερασματικά, και οι τρεις αλγόριθμοι μπορούν να απομονώσουν το φύλλωμα των αμπελιών με επιτυχία, που είναι μία χρήσιμη πληροφορία για την αξιολόγηση της κατάστασης της καλλιέργειας, και αποτελούν χρήσιμα εργαλεία για την εφαρμογή τεχνικών αμπελουργίας ακριβείας σε αυτή.

2.4 Ταξινόμηση Εικόνας και Αλγόριθμοι Μηχανικής Μάθησης

Με τον όρο ταξινόμηση πολυφασματικής εικόνας περιγράφεται η διαδικασία αυτόματης αναγνώρισης, διαχωρισμού και ομαδοποίησης των εικονοστοιχείων σε τάξεις ή κλάσεις με κοινά χαρακτηριστικά. Στα πλαίσια της Τηλεπισκόπησης, η ταξινόμηση βασίζεται στη φασματική υπογραφή κάθε εικονοστοιχείου για κάθε φασματικό κανάλι του δορυφορικού αισθητήρα και στοχεύει στη δημιουργία φασματικά ομοιογενών κλάσεων, που να παρουσιάζουν ανομοιογένεια μεταξύ τους. Οι τάξεις που δημιουργούνται αντιπροσωπεύουν διάφορους τύπους οντοτήτων στην εικόνα, όπως φυτοκάλυψη, καλλιέργειες, εδάφη, υδάτινες επιφάνειες κλπ. και συνθέτουν ένα θεματικό χάρτη. Η ταξινόμηση των δορυφορικών εικόνων πραγματοποιείται για να κατηγοριοποιηθεί κάθε εικονοστοιχείο σε κάποια κατηγορία κάλυψης γης.

Πιο συγκεκριμένα, η ταξινόμηση μιας δορυφορικής εικόνας συντελείται για να μετατραπούν τα αρχικά δεδομένα (φασματικές υπογραφές) σε χρήσιμες πληροφορίες, οι οποίες με τη σειρά τους συνθέτουν θεματικούς χάρτες (Mountrakis et al., 2011). Σε αυτές τις ταξινομήσεις κάθε εικονοστοιχείο αντιμετωπίζεται ως μεμονωμένο αντικείμενο, που κατηγοριοποιείται ανεξάρτητα από όλα τα υπόλοιπα εικονοστοιχεία, με βάση τα φασματικά χαρακτηριστικά του. Όταν η ταξινόμηση πραγματοποιείται με βάση τη φασματική υπογραφή του κάθε εικονοστοιχείου ξεχωριστά, καλείται πολυφασματική ταξινόμηση (multispectral classification).

Για κάθε τάξη δημιουργείται ένα φασματικό πρότυπο με βάση τα δεδομένα εκπαίδευσης, το οποίο αποτελείται από τις τιμές της έντασης της ακτινοβολίας σε κάθε φασματικό κανάλι των δεδομένων. Κατά τη διαδικασία της ταξινόμησης, η φασματική υπογραφή κάθε εικονοστοιχείου συγκρίνεται με τα φασματικά πρότυπα και σύμφωνα με αυτά κατηγοριοποιείται στην αντίστοιχη τάξη.

Μέθοδοι Ταξινόμησης

Σύμφωνα με τους Al-doski et al. (2013), υπάρχουν διάφορες προσεγγίσεις ταξινόμησης που έχουν αναπτυχθεί και ευρέως χρησιμοποιηθεί για την παραγωγή χαρτών κάλυψης γης. Ανάλογα με τον τρόπο προσέγγισης του προβλήματος, η ταξινόμηση μπορεί να κατηγοριοποιηθεί σε μία από τις παρακάτω κατηγορίες ή ακόμα και να ανήκει σε περισσότερες από μία κατηγορίες:

- Επιβλεπόμενη και Μη-Επιβλεπόμενη
- Παραμετρική και Μη-Παραμετρική
- Hard και Soft (Fuzzy)
- Pixel-based και Object-based

Στην επιβλεπόμενη ταξινόμηση τα δεδομένα εκπαίδευσης είναι γνωστά και η διαδικασία ξεκινά με την εκπαίδευση του ταξινομητή με αυτά τα δεδομένα, ενώ στη μη-επιβλεπόμενη το σύνολο των δεδομένων εκπαίδευσης είναι άγνωστο και τα εικονοστοιχεία ομαδοποιούνται μόνο με βάση τη φασματική τους συμπεριφορά. Οι παραμετρικοί ταξινομητές βασίζονται στη στατιστική κατανομή πιθανότητας κάθε τάξης, ενώ οι μη-παραμετρικοί χρησιμοποιούνται σε περιπτώσεις όπου η συνάρτηση πυκνότητας είναι άγνωστη με σκοπό τον υπολογισμό της πιθανότητας της συνάρτησης πυκνότητας (Kumar et al., 2012). Στη Hard ταξινόμηση, κάθε εικονοστοιχείο πρέπει να ταξινομηθεί σε μία μόνο κατηγορία, ενώ στη Soft ή Fuzzy κάθε εικονοστοιχείο ταξινομείται σε παραπάνω από μία κατηγορίες, με χρήση συναρτήσεων συμμετοχής σε καθεμία από αυτές. Τέλος, στην pixel-based ταξινόμηση η στοιχειώδης μονάδα ανάλυσης της εικόνας είναι το εικονοστοιχείο, ενώ στην object-based είναι το αντικείμενο, που αποτελεί μία ομάδα εικονοστοιχείων με κοινά φασματικά χαρακτηριστικά και γεωμετρικές και τοπολογικές συσχετίσεις.

Στην παρούσα εργασία υλοποιείται μία Pixel-based Επιβλεπόμενη ταξινόμηση, όπου σε κάθε εικονοστοιχείο αντιστοιχεί ένα διάνυσμα με n τιμές. Παρακάτω παρατίθενται κάποιοι ορισμοί για την ορολογία που θα χρησιμοποιηθεί στη συνέχεια:

- Ταξινομητής (classifier): το εκπαιδευμένο μοντέλο που προκύπτει από την εφαρμογή ενός αλγορίθμου ταξινόμησης σε ένα σύνολο διανυσμάτων.
- Σύνολο χαρακτηριστικών τιμών (features): ένα διάνυσμα που αντιστοιχεί σε κάθε εικονοστοιχείο και έχει n τιμές, όπου το n εξαρτάται από τον αριθμό των φασματικών καναλιών του δορυφορικού αισθητήρα και από τα υπόλοιπα χαρακτηριστικά γνωρίσματα των εικονοστοιχείων (χαρακτηριστικά υψής, δείκτες βλάστησης, κλπ.) που λαμβάνονται υπόψη για την ταξινόμηση.
- Κατηγορία ή Τάξη ή Κλάση (label): η κατηγορία κάλυψης γης στην οποία αντιστοιχίζονται τα υπό ταξινόμηση εικονοστοιχεία.

Αλγόριθμοι Μηχανικής Μάθησης

Το 1959, ο όρος Μηχανική Μάθηση ορίζεται από τον Arthur Samuel ως «Πεδίο μελέτης που δίνει στους υπολογιστές την ικανότητα να μαθαίνουν, χωρίς να έχουν ρητά προγραμματιστεί». Η Μηχανική Μάθηση (Machine Learning) αποτελεί τον τομέα μελέτης και κατασκευής αλγορίθμων, οι οποίοι εκπαιδεύονται με τα δεδομένα εισόδου – εκπαίδευσης (training set) και κάνουν προβλέψεις (prediction) βασιζόμενοι στην εκπαίδευσή τους. Αυτό το είδος των αλγορίθμων βρίσκει εφαρμογή σε υπολογιστικές εργασίες, όπου ο σχεδιασμός και ο ρητός προγραμματισμός άλλων αλγορίθμων είναι ανέφικτος.

Μηχανική Μάθηση είναι η διαδικασία εκτίμησης μίας άγνωστης συνάρτησης ή δομής που εμφανίζεται μεταξύ των δεδομένων εισόδου και εξόδου ενός συστήματος. Η επιλογή ενός αλγορίθμου ο οποίος θα εκτιμήσει αυτή την άγνωστη εξάρτηση μεταξύ των δεδομένων εισόδου και εξόδου, με βάση τα δεδομένα εκπαίδευσης που παρέχονται, αποτελεί τη διαδικασία εκπαίδευσης – μάθησης. Μετά την εκτίμηση μιας τέτοιας εξάρτησης, ο αλγόριθμος μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την πρόβλεψη αποτελεσμάτων – εξόδων από γνωστές τιμές εισόδου. Με άλλα λόγια, ο αλγόριθμος δημιουργεί μία συνάρτηση που αποτελείται από γνωστές εισόδους και τις αντίστοιχες εξόδους τους και στοχεύει στη γενίκευση της συνάρτησης και για εισόδους με άγνωστη έξοδο.

Η Μηχανική Μάθηση αποτελεί έναν από τους σημαντικότερους τομείς έρευνας της Τεχνητής Νοημοσύνης (Artificial Intelligence). Στόχος της Τεχνητής Νοημοσύνης είναι η δημιουργία συστημάτων, τα οποία αφού εκπαιδεύονται από εμπειρικά δεδομένα που έχουν συλλεχθεί στο παρελθόν, να μπορούν να εκτελούν την εργασία για την οποία προορίζονται αποτελεσματικότερα. Η διαδικασία εκμάθησης αναλύεται στα παρακάτω επιμέρους στάδια:

- Απόκτηση εμπειρικών δεδομένων εκπαίδευσης από την αλληλεπίδραση με το περιβάλλον.
- Επεξεργασία των δεδομένων, ώστε να βρεθούν πιθανές γενικεύσεις ή εξειδικεύσεις (διαδικασία εκπαίδευσης).
- Χρησιμοποίηση των αποτελεσμάτων της επεξεργασίας για την εκτέλεση της εργασίας στόχου.

Οι αλγόριθμοι Μηχανικής Μάθησης είναι ευρέως διαδεδομένοι τα τελευταία χρόνια ως νέες προηγμένες μέθοδοι ταξινόμησης. Οι κυριότεροι λόγοι είναι ότι προσεγγίζουν αποτελεσματικά μη γραμμικά προβλήματα παλινδρόμησης και ταξινόμησης (επιβλεπόμενα ή μη) και μπορούν να περιλαμβάνουν δεκάδες έως και χιλιάδες μεταβλητές. Επιπλέον, είναι ιδανικοί για προβλήματα που η θεωρητική γνώση είναι ελλιπής, ωστόσο υπάρχει αριθμός παρατηρήσεων και δεδομένων. Κατηγοριοποιούνται ανάλογα με το επιθυμητό αποτέλεσμα του αλγορίθμου, στις εξής κατηγορίες:

- Μη – Επιβλεπόμενη και Επιβλεπόμενη Μάθηση
- Ημι – επιβλεπόμενη Μάθηση
- Ενισχυτική Μάθηση

Στη μη-επιβλεπόμενη μάθηση (unsupervised learning) τα δεδομένα εισόδου δεν αντιστοιχούν σε δεδομένα εξόδου, αλλά χωρίζονται σε άγνωστες κατηγορίες με βάση τα χαρακτηριστικά τους. Για τα δεδομένα εισόδου που διαφέρουν υπερβολικά από όλες τις κατηγορίες θεωρείται ότι αποτελούν κάποια ανωμαλία. Στην επιβλεπόμενη μάθηση (supervised learning) τα δεδομένα εισόδου αντιστοιχούν σε δεδομένα εξόδου, που εν προκειμένω είναι οι κατηγορίες κάλυψης γης. Επομένως, είναι γνωστές εκ των προτέρων οι κατηγορίες που πρόκειται να εμφανιστούν στην έξοδο. Η ημι-επιβλεπόμενη μάθηση (semi-supervised learning) είναι συνδυασμός των δύο παραπάνω κατηγοριών, επομένως η ακρίβεια είναι αυξημένη. Τέλος, στην ενισχυτική μάθηση (reinforcement learning) ο αλγόριθμος μαθαίνει μια στρατηγική ενεργειών για μια δεδομένη παρατήρηση – είσοδο.

2.5 Συνδυαστικοί Ταξινομητές και Ταξινομητής Random Forest

Τα τελευταία χρόνια η ερευνητική κοινότητα στρέφει την προσοχή της στους συνδυαστικούς ταξινομητές. Οι συνδυαστικοί ταξινομητές βασίζονται στη δημιουργία ενός εκτιμητικού μοντέλου, μέσω της συνένωσης πολλών όμοιων ή ανόμοιων μεταξύ τους μοντέλων. Το συνδυαστικό μοντέλο που προκύπτει εκπαιδεύεται είτε μέσω της διαδικασίας Bagging, κατά την οποία ο κάθε ταξινομητής από τον οποίο απαρτίζεται το συνδυαστικό μοντέλο εκπαιδεύεται με βάση ένα τυχαίο επιλεγμένο υποσύνολο του συνόλου των δεδομένων, είτε μέσω της διαδικασίας Boosting, όπου το μοντέλο εκπαιδεύεται επανειλημμένα χρησιμοποιώντας όλο το σύνολο των δεδομένων εκπαίδευσης. Σύμφωνα με έρευνες των Briem et al. (2002) και Miao et al. (2012), τα συνδυαστικά μοντέλα που προκύπτουν από τις εν λόγω διαδικασίες εκπαίδευσης ξεπερνούν σε απόδοση κάθε ένα από τα μοντέλα από τα οποία απαρτίζονται και επίσης είναι πιο σταθερά και αποτελεσματικά έναντι στο θόρυβο και στη φασματική διακύμανση που παρουσιάζουν τα δεδομένα εκπαίδευσης.

Ταξινομητής Random Forest

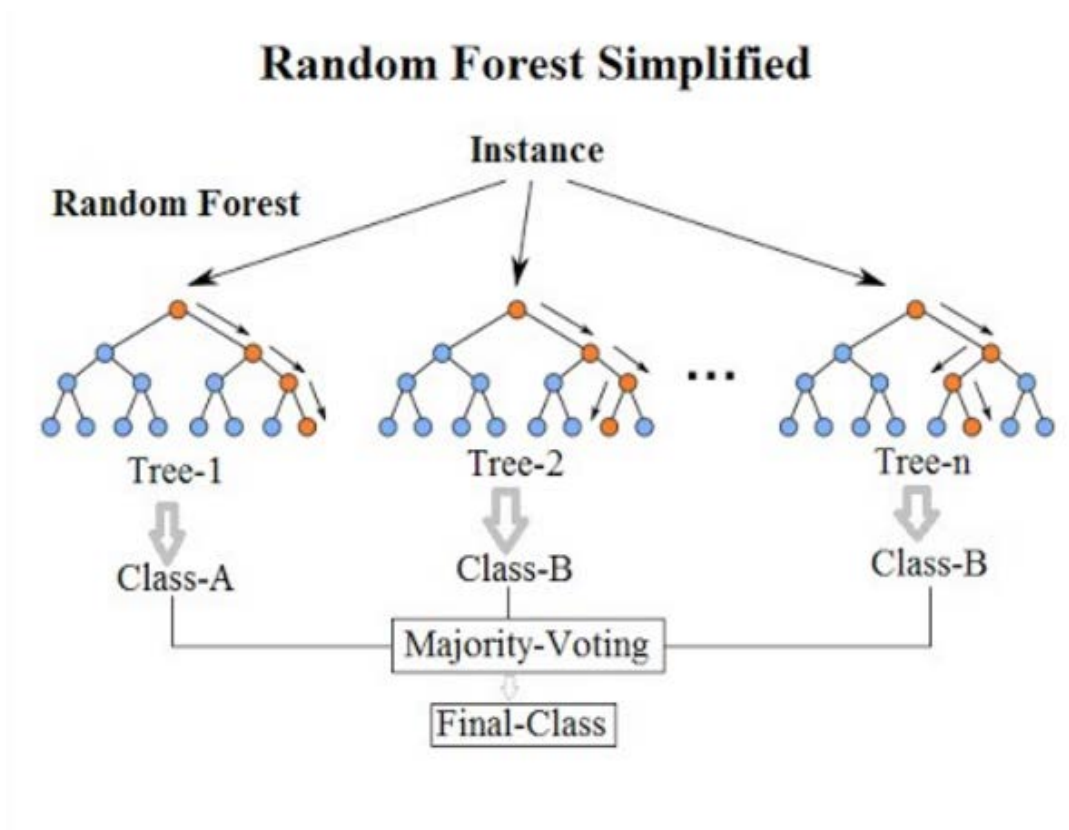
Ο ταξινομητής Random Forest (RF), γνωστός και ως ταξινομητής Τυχαίων Δασών, είναι ένας από τους πιο διαδεδομένους ομοιογενείς, συνδυαστικούς ταξινομητές, ο οποίος χρησιμοποιεί πολλά ασυσχέτιστα μεταξύ τους δέντρα αποφάσεων (decision trees) για να πραγματοποιήσει μία εκτίμηση (Belgiu et al., 2016). Ο βασικός στόχος του Random Forest είναι η μείωση της συσχέτισης μεταξύ των ταξινομητών που τον απαρτίζουν και ο περιορισμός του φαινομένου overfitting που προκαλεί την προσαρμογή του μοντέλου στο θόρυβο που υπάρχει στα δεδομένα.

Ο τρόπος λειτουργίας του ταξινομητή Random Forest περιγράφεται συνοπτικά ως εξής:

1. Ανάπτυξη πολλών δέντρων αποφάσεων από τα οποία θα προκύψει η ταξινόμηση (classification decision trees).
2. Από κάθε δέντρο προκύπτει μία ταξινόμηση, δηλαδή κάθε δέντρο αντιστοιχίζει κάθε εικονοστοιχείο σε μία κλάση.
3. Επομένως, κάθε κλάση έχει έναν αριθμό ψήφων.
4. Η τελική και οριστική ταξινόμηση γίνεται με τον ταξινομητή να επιλέγει την κλάση με τις περισσότερες ψήφους για κάθε εικονοστοιχείο.

Για την κατασκευή ενός δέντρου απόφασης ανατίθεται αρχικά στη ρίζα του το σύνολο των δεδομένων εκπαίδευσης. Κάθε ενδιάμεσος κόμβος περιέχει υποσύνολο των δειγμάτων, το οποίο μέσω ενός ελέγχου διαχωρίζεται σε δύο ή περισσότερα μικρότερα υποσύνολα στο επόμενο επίπεδο. Ο έλεγχος συνήθως αφορά σε ένα υποσύνολο των χαρακτηριστικών των δεδομένων εκπαίδευσης.

Η ανεξάρτητη ανάπτυξη των δέντρων που απαρτίζουν το συνδυαστικό μοντέλο βασίζεται στην επιλογή τυχαίων υποσυνόλων δεδομένων εκπαίδευσης (Bagging), με αντικατάσταση. Επομένως, μέρος του συνόλου των δειγμάτων που χρησιμοποιούνται για την εκπαίδευση ενός δέντρου μπορεί να επιλεγεί περισσότερες από μία φορές για την εκπαίδευση και άλλων δέντρων μέσα στο σύμπλεγμα, ενώ άλλα δείγματα ενδέχεται να μην επιλεγούν καθόλου. Τα υποσύνολα εκπαίδευσης που δημιουργούνται είναι διαφορετικά μεταξύ τους και κατά συνέπεια στατιστικά ανεξάρτητα. Η δεύτερη πηγή τυχαιότητας στο μοντέλο Random Forest αφορά στην τυχαία επιλογή των μεταβλητών (καναλιών), με βάση τα οποία ορίζονται τα φασματικά όρια διαχωρισμού σε κάθε εσωτερικό κόμβο (internal splitting node). Η επιλογή ενός υποσυνόλου εκπαίδευσης έχει θετική επίδραση στη μείωση του υπολογιστικού χρόνου, ενώ η επιλογή μερικώς ή εξ' ολοκλήρου διαφορετικού υποσυνόλου δεδομένων εκπαίδευσης για κάθε δέντρο συντελεί στην ανάπτυξη διαφορετικών εκτιμητών, ικανών να προσαρμοστούν σε διαφορετικά είδη δεδομένων, για να βελτιωθεί η απόδοση του αλγορίθμου (Criminisi et al., 2011). Η μείωση της συσχέτισης μεταξύ των δέντρων οδηγεί σε μείωση της αστάθειας (ύπαρξη τυχαίων σφαλμάτων) που παρουσιάζουν τα δενδροειδή μοντέλα από τα οποία απαρτίζεται το δάσος.



Σχήμα 2.1. Σχηματική αναπαράσταση της δομής του ταξινομητή Random Forest.

Πηγή: www.medium.com.

Πλεονεκτήματα και Μειονεκτήματα του ταξινομητή Random Forest

Τα κύρια πλεονεκτήματα του Random Forest είναι τα εξής:

- Μπορούν να εκπαιδευτούν σε σύνολα δεδομένων υψηλής διάστασης, χωρίς να εμφανίσουν σημαντικό βαθμό υπερεκπαίδευσης.
- Εξαιτίας του μεγάλου αριθμού δέντρων στο δάσος, το σφάλμα γενίκευσης είναι περιορισμένο, με αποτέλεσμα να μην προκύπτουν φαινόμενα υπερεκπαίδευσης.
- Μη επαναληπτική διαδικασία εκπαίδευσης, ο αλγόριθμος ολοκληρώνεται σε σταθερό αριθμό βημάτων.
- Η τυχαία επιλογή ενός υποσυνόλου των χαρακτηριστικών για το διαχωρισμό των παραδειγμάτων κάθε ενδιάμεσου κόμβου ελαττώνει τη συσχέτιση ανάμεσα στα δέντρα και διατηρεί την πόλωση σε χαμηλά επίπεδα. Χρησιμοποιώντας ένα σύνολο δέντρων απόφασης μειώνεται και η διακύμανση.

- Η διάσχιση ενός δέντρου από ένα παράδειγμα, ξεκινώντας από τη ρίζα και καταλήγοντας σε έναν από τους τερματικούς κόμβους γίνεται λογαριθμικά ως προς το πλήθος των φύλλων του.
- Παρουσιάζει ανεκτικότητα ως προς το θόρυβο και τα αριθμητικά σφάλματα στα δεδομένα εκπαίδευσης.
- Για την επαγωγή κάθε δέντρου, περίπου το $1/3$ των δεδομένων δεν επιλέγεται για εκπαίδευση. Αυτά τα παραδείγματα καλούνται Out-of-Bag και μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την εκτίμηση της πιθανότητας σφάλματος, εξαλείφοντας την ανάγκη ύπαρξης ενός συνόλου ελέγχου ή της τεχνικής cross-validation.
- Παράγει μια εσωτερική αμερόληπτη εκτίμηση του σφάλματος γενίκευσης, καθώς εξελίσσεται η διαδικασία κατασκευής του δέντρου.
- Υπάρχει η δυνατότητα παράλληλης επαγωγής δέντρων.
- Αναζητά τον καλύτερο διαχωρισμό σε ένα μικρό υποσύνολο των χαρακτηριστικών και δεν κάνει εξαντλητική αναζήτηση, όπως ο αλγόριθμος Boosting.
- Μπορεί να χρησιμοποιηθεί για ομαδοποίηση.
- Επιτρέπει τη δημιουργία παραλλαγών της βασικής τεχνικής ως προς την κατασκευή του μοντέλου ταξινόμησης, για παράδειγμα τη χρήση διαφορετικών τεχνικών διαχωρισμού των παραδειγμάτων των ενδιάμεσων κόμβων.

Υπάρχουν όμως και κάποια σημαντικά μειονεκτήματα του ταξινομητή Random Forest και παρουσιάζονται παρακάτω:

- Υψηλό υπολογιστικό κόστος.
- Υπάρχει σημαντικό πλήθος ελεύθερων παραμέτρων τις οποίες πρέπει να προσδιορίσει ο χρήστης, όπως το πλήθος των δέντρων, το βαθμό των κόμβων, το πλήθος παραδειγμάτων εκπαίδευσης και τη συνθήκη τερματισμού του διαχωρισμού των κόμβων.
- Για την επέκταση ενός μοντέλου με στόχο την εισαγωγή μίας ακόμα κατηγορίας ταξινόμησης, απαιτείται η κατασκευή του μοντέλου από την αρχή.
- Κάθε νέο παράδειγμα πρέπει να διασχίσει όλα τα δέντρα του δάσους για την εκτίμηση της κατηγορίας του.

3. ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

3.1 Συλλογή Δεδομένων

Πρώτο στάδιο για την εφαρμογή της μεθοδολογίας της παρούσας εργασίας ήταν η συλλογή των δεδομένων και η μετέπειτα επεξεργασία και αξιοποίησή τους για την παραγωγή αποτελεσμάτων. Η συλλογή των δεδομένων αφορά στην απόκτηση των δορυφορικών εικόνων WorldView-3 και WorldView-2 για την περίοδο του Ιουλίου 2017. Για τις ανάγκες της εργασίας μελετήθηκαν επτά οινοπαραγωγικές περιοχές της Ελλάδας, οι οποίες περιγράφονται παρακάτω.

3.1.1 Περιοχές Μελέτης

Τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν για τους σκοπούς της εργασίας αφορούν σε επτά οινοπαραγωγικές περιοχές και καλύπτουν μεγάλες εκτάσεις στη βόρεια, την κεντρική και τη νότια Ελλάδα. Η επιλογή των περιοχών βασίστηκε στη συμβολή τους στην εγχώρια παραγωγή κρασιού, καθώς παράγουν μεγάλες ποσότητες σταφυλιών από τα οποία προέρχονται πολλές ετικέτες οίνου, καθώς και στα ιδιαίτερα ποιοτικά χαρακτηριστικά που προσδίδονται στα παραγόμενα κρασιά, διότι όλες οι περιοχές ανήκουν σε ζώνες Προστατευόμενης Ονομασίας Προέλευσης (ΠΟΠ) ή σε ζώνες Προστατευόμενης Γεωγραφικής Ένδειξης (ΠΓΕ).

Οι ορισμοί για τις κατηγορίες ΠΟΠ και ΠΓΕ παρατίθενται παρακάτω (<http://www.minagric.gr>):

Προστατευόμενη Ονομασία Προέλευσης (ΠΟΠ)

Ως «ονομασία προέλευσης» νοείται η ονομασία που ταυτοποιεί ένα προϊόν:

- α. το οποίο κατάγεται από συγκεκριμένο τόπο, περιοχή ή, σε εξαιρετικές περιπτώσεις, χώρα,
- β. του οποίου η ποιότητα ή τα χαρακτηριστικά οφείλονται κυρίως ή αποκλειστικά στο ιδιαίτερο γεωγραφικό περιβάλλον, που συμπεριλαμβάνει τους εγγενείς φυσικούς και ανθρώπινους παράγοντες και
- γ. του οποίου όλα τα στάδια της παραγωγής εκτελούνται εντός της οριοθετημένης γεωγραφικής περιοχής.

Προστατευόμενη Γεωγραφική Ένδειξη (ΠΓΕ)

Ως «γεωγραφική ένδειξη» νοείται η ονομασία που ταυτοποιεί ένα προϊόν:

- α. το οποίο κατάγεται από συγκεκριμένο τόπο, περιοχή ή χώρα,
- β. του οποίου ένα συγκεκριμένο ποιοτικό χαρακτηριστικό, ή φήμη ή άλλο χαρακτηριστικό μπορεί να αποδοθεί κυρίως στη γεωγραφική του προέλευση και
- γ. του οποίου ένα τουλάχιστον από τα στάδια της παραγωγής εκτελείται εντός της οριοθετημένης γεωγραφικής περιοχής.

Για κάθε περιοχή μελέτης εντοπίστηκε η αντίστοιχη περιοχή ΠΟΠ ή ΠΓΕ στην οποία ανήκει μέσω της κοινοτικής βάσης δεδομένων eAmbrosia της Ευρωπαϊκής Ένωσης,

η οποία αποτελεί ένα μητρώο γεωγραφικών ενδείξεων της Ε.Ε. (<https://ec.europa.eu>).

Η πρώτη περιοχή μελέτης βρίσκεται στο Αμύνταιο, στο βορειοδυτικό τμήμα της Μακεδονίας, κοντά στον οικισμό του Αμυνταίου, δίπλα στη λίμνη Βεγορίτιδα και σε υψόμετρο περίπου 610 m. Είναι εντός των ορίων της ζώνης ΠΟΠ Αμυνταίου, η οποία κατέχει την ένδειξη ΠΟΠ λόγω της καλλιέργειας της ποικιλίας Ξινόμαυρο. Η δεύτερη περιοχή μελέτης βρίσκεται στην Κρήτη και συγκεκριμένα στο νομό Ηρακλείου, κοντά στο χωριό Στίρνας και σε υψόμετρο περίπου 500 m από τη στάθμη της θάλασσας. Η περιοχή ανήκει στην ΠΓΕ Κρήτης. Η τρίτη περιοχή βρίσκεται στη Δράμα, στα ανατολικά της πόλης, κοντά στα χωριά Αδριανή και Δοξάτο. Η περιοχή αυτή ανήκει στην ΠΓΕ Δράμας και βρίσκεται σε υψόμετρο 150 m. Η τέταρτη περιοχή βρίσκεται στην Επανομή, βόρεια του οικισμού και ανατολικά από την πόλη της Θεσσαλονίκης. Βρίσκεται σε υψόμετρο 85 m από την επιφάνεια της θάλασσας και συμπεριλαμβάνεται στα όρια της ΠΓΕ Επανομής.

Η πέμπτη περιοχή μελέτης βρίσκεται επίσης στο νομό Δράμας, στα δυτικά της πόλης, κοντά στο χωριό Καλή Βρύση. Το υψόμετρό της είναι περίπου 220 m και βρίσκεται εντός των ορίων της ΠΓΕ Δράμας. Η έκτη περιοχή βρίσκεται νότια της Μαντινείας στο νομό Αρκαδίας, σε υψόμετρο 720 m. Εντάσσεται στη ζώνη ΠΟΠ Μαντινείας, η οποία κατέχει την ένδειξη ΠΟΠ για τις ποικιλίες Μοσχοφίλερο και Ασπρούδες. Η έβδομη περιοχή μελέτης βρίσκεται στη Νάουσα Ημαθίας, στη δυτική Μακεδονία και πιο συγκεκριμένα κοντά στον οικισμό Γιαννακοχώρι, σε υψόμετρο περίπου 110 m. Η περιοχή εντάσσεται σε δύο ζώνες: στην ΠΓΕ Ημαθίας και στην ΠΟΠ Νάουσας, η οποία κατέχει την ένδειξη ΠΟΠ για την ποικιλία Ξινόμαυρο.



Εικόνα 3.1. Οι περιοχές μελέτης στην Ελλάδα.

3.1.2 Πολυφασματικά τηλεπισκοπικά δεδομένα WorldView-3

Τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν για την παρούσα εργασία ήταν οπτικές εικόνες που προέρχονται από το δορυφορικό αισθητήρα WorldView-3, έναν σουπερ-φασματικό (super-spectral) αισθητήρα πολύ υψηλής χωρικής ανάλυσης. Εκτοξεύτηκε στις 13 Αυγούστου 2014 σε υψόμετρο 617 km από τη Γη και έχει τη δυνατότητα να καλύπτει έως και 680.000 km² ημερησίως. Παρακάτω παρατίθενται κάποια βασικά χαρακτηριστικά του αισθητήρα.

Χαρακτηριστικά του δορυφορικού αισθητήρα WorldView-3	
Χωρική Ανάλυση	0,31 m παγχρωματικό 1,24 m πολυφασματικό 3,7 m SWIR 30 m CAVIS
Φασματικό Εύρος	Παγχρωματικό: 450-800 nm Παράκτιο Μπλε: 400-450 nm Μπλε: 450-510 nm Πράσινο: 510-580 nm Κίτρινο: 585-625 nm Κόκκινο: 630-690 nm

Οριακό Κόκκινο: 705-745 nm
 Εγγύς Υπέρυθρο 1: 770-895 nm
 Εγγύς Υπέρυθρο 2: 860-1040 nm
SWIR (1 – 8): 1184-2373 nm
CAVIS – Desert Clouds: 405-420 nm
 Aerosol-1: 459-509 nm
 Green: 525-585 nm
 Aerosol-2: 635-685 nm
 Water-1: 845-885 nm
 Water-2: 897-927 nm
 Water-3: 930-965 nm
 NDVI-SWIR: 1220-1252 nm
 Cirrus: 1365-1405 nm
 Snow: 1620-1680 nm
 Aerosol-3: 2105-2245 nm

Ραδιομετρική Ανάλυση	11 bits ανά pixel
Μορφή Συμπίεσης Εικόνας	GeoTIFF
Συχνότητα Επανεπίσκεψης	< 1 ημέρα
Μέγιστη Έκταση Συλλογής σε ένα πέρασμα	66,5 km * 112 km (μονοεικονική) 26,6 km * 112 km (στέρεο)

Πίνακας 3.1 – Βασικά χαρακτηριστικά του δορυφόρου WorldView-3.

Πηγή: <http://www.satimagingcorp.com>

Στα πλεονεκτήματα του δορυφόρου συγκαταλέγονται τα κάτωθι:

- Πολύ υψηλής χωρικής ανάλυσης πολυφασματικές εικόνες.
- Η δυνατότητα λήψης εικόνων από μεγάλες περιοχές εξαλείφει τη χρονική παραλλακτικότητα.
- Είναι δυνατή η μεγάλη γεωγραφική ακρίβεια χωρίς να χρησιμοποιούνται σημεία ελέγχου στο έδαφος.
- Χρήση των δορυφορικών εικόνων σε ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών: Χαρτογράφηση, Ταξινόμηση Εδαφών, Διαχείριση Καταστροφών, Ανίχνευση Αλλαγών στις Χρήσεις Γης, Διαχείριση Εδαφών και Καλλιεργειών, Γεωλογικά Θέματα (εξόρυξη πετρελαίου, φυσικού αερίου), Παρακολούθηση περιβαλλοντικών φαινομένων, Θαλάσσιες εφαρμογές (Βαθυμετρία, Διαχείριση παράκτιων περιοχών), Αναγνώριση ανθρωπογενών υλικών.

Ο αισθητήρας WorldView-3 διαθέτει πολύ υψηλή φασματική ανάλυση καθώς περιλαμβάνει 8 πολυφασματικά κανάλια, 8 μικροκυματικά εγγύς υπέρυθρα κανάλια (SWIR) και 12 CAVIS (Clouds, Aerosols, Vapors, Ice, Snow) κανάλια. Κάθε ένα από τα πολυφασματικά κανάλια αντιπροσωπεύει διαφορετικό εύρος του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος και χρησιμοποιείται για διαφορετικές εφαρμογές. Το παγχρωματικό κανάλι έχει εύρος 450-800 nm. Ακολουθούν κάποιες πληροφορίες για καθένα από τα πολυφασματικά κανάλια (Πηγή: <http://www.satimagingcorp.com>):

Coastal Blue (400-450 nm)

- Στα υγιή φυτά απορροφάται από τη χλωροφύλλη
- Απορροφάται ελάχιστα από το νερό, για αυτό το λόγο χρησιμοποιείται σε βαθυμετρικές μελέτες
- Βελτιώνει τις ατμοσφαιρικές διορθώσεις, καθώς επιδρά στην ατμοσφαιρική σκέδαση

Blue (450-510 nm)

- Απορροφάται από τη χλωροφύλλη στα φυτά
- Διεισδύει στις υδάτινες επιφάνειες
- Δεν επηρεάζει σημαντικά τις ατμοσφαιρικές διορθώσεις, καθώς επιδρά λιγότερο στην ατμοσφαιρική σκέδαση σε σχέση με το Coastal Blue

Green (510-580 nm)

- Χρησιμοποιείται στον εντοπισμό της υγιούς βλάστησης, καθώς είναι το κανάλι στο οποίο αποτυπώνεται η μέγιστη ανακλαστικότητα της
- Παρέχει τη δυνατότητα διάκρισης των διαφορετικών καλλιεργειών και των διαφορετικών τύπων βλάστησης

Yellow (585-625 nm)

- Χρησιμεύει στην παρατήρηση της κατάστασης της ανάπτυξης των καλλιεργειών και κυρίως στον εντοπισμό χλωρώσεων (κιτρινίσματος) στα φυτά
- Ωφέλιμο και για την ταξινόμηση των χαρακτηριστικών μιας εικόνας

Red (630-690 nm)

- Αντιπροσωπεύει το εύρος του μήκους κύματος που απορροφά η χλωροφύλλη στα υγιή φυτά
- Το χρησιμότερο κανάλι για τη διάκριση της βλάστησης
- Χρησιμεύει στην ταξινόμηση του γυμνού εδάφους, των γεωλογικών σχηματισμών και των δρόμων

Red Edge (705-745 nm)

- Σημαντικό κανάλι για την ταξινόμηση της βλάστησης
- Χρησιμεύει στην αξιολόγηση της κατάστασης της υγείας των φυτών και στον εντοπισμό προβλημάτων στη φυσιολογία τους

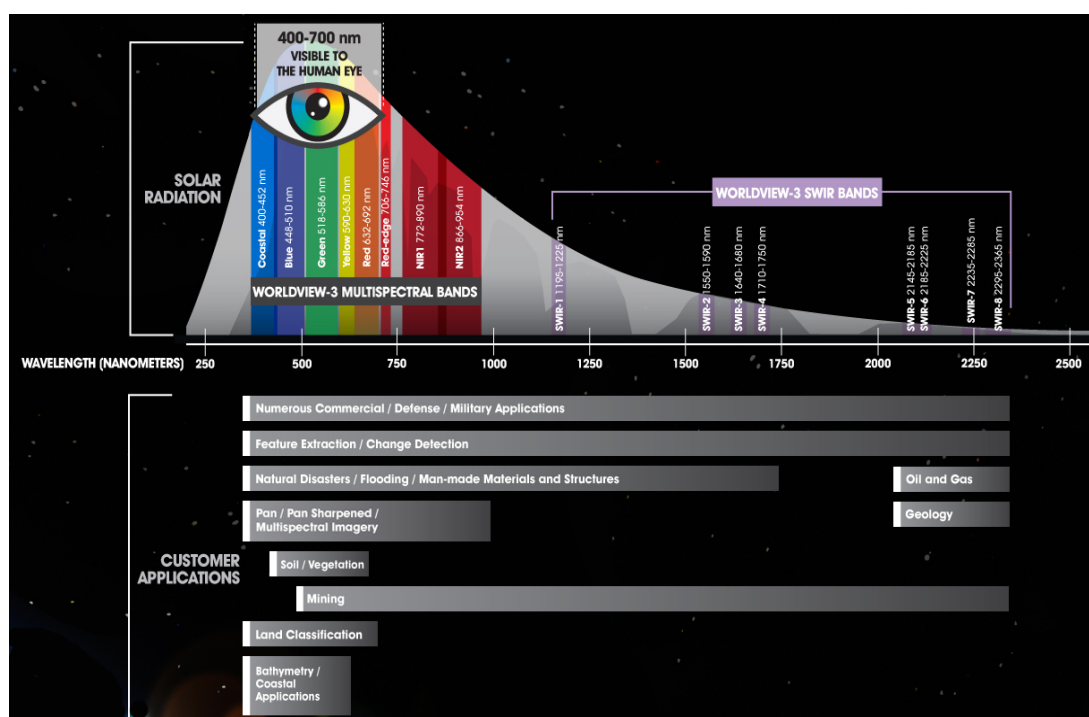
NIR1 (770-895 nm)

- Παρέχει τη δυνατότητα εκτίμησης του ποσοστού υγρασίας και της βιομάζας των φυτών, με αποτέλεσμα να χρησιμοποιείται για την αναγνώριση των τύπων βλάστησης
- Πολύ αποτελεσματικό στο διαχωρισμό των υδάτινων επιφανειών από τη βλάστηση
- Κατ' επέκταση χρησιμοποιείται για να διαχωρίζει τύπους εδαφών με βάση το προφίλ υγρασίας που διαθέτουν

NIR2 (860-1040 nm)

- Επικαλύπτεται από το κανάλι NIR1, αλλά επηρεάζεται λιγότερο από την ατμοσφαιρική επίδραση
- Χρησιμοποιείται για διαχωρισμό βλάστησης και εκτίμηση βιομάζας

Το φασματικό εύρος για κάθε κανάλι του δορυφόρου WorldView-3, καθώς και κάποιες από τις εφαρμογές που περιγράφηκαν παραπάνω και υλοποιούνται με τη χρήση των αντίστοιχων καναλιών παρουσιάζονται στο Σχήμα 3.1.



Σχήμα 3.1 - Φασματικό εύρος για τα κανάλια του δορυφόρου WorldView-3.

Πηγή: <http://www.satimagingcorp.com>

Για τις ανάγκες της εργασίας χρησιμοποιήθηκαν έξι παγχρωματικές και έξι πολυφασματικές εικόνες του δορυφορικού αισθητήρα WorldView-3. Οι εικόνες αυτές παρασχέθηκαν από την εταιρεία DigitalGlobe στο Εργαστήριο Τηλεπισκόπησης της Σ.Α.Τ.Μ. μετά από σχετικό αίτημα. Η λήψη όλων των εικόνων έγινε την ίδια ημέρα και συγκεκριμένα στις 29 Ιουλίου 2017. Οι περιοχές που απεικονίζονται είναι το Αμύνταιο, η Δράμα, η Επανομή, Η Καλή Βρύση στη Δράμα, η Μαντινεία και η Νάουσα. Το γεωδαιτικό σύστημα αναφοράς που χρησιμοποιείται σε όλες τις εικόνες είναι το WGS 84 (World Geodetic System).

Αμύνταιο



Δράμα



Επανομή



Καλή Βρύση



Μαντινεία



Νάουσα



Εικόνα 3.2 – Τμήματα των δορυφορικών εικόνων WorldView-3 για τις έξι περιοχές μελέτης σε φυσικό έγχρωμο σύνθετο.

Επιπλέον των παραπάνω έξι εικόνων, στα πλαίσια της παρούσας εργασίας χρησιμοποιήθηκε ακόμα μία δορυφορική εικόνα η οποία προέρχεται από το δορυφορικό αισθητήρα WorldView-2. Ο δορυφορικός αισθητήρας WorldView-2 είναι προγενέστερος από τον WorldView-3, δε διαθέτει τα 8 μικροκυματικά εγγύς υπέρυθρα κανάλια και τα 12 CAVIS κανάλια, αλλά έχει και αυτός 8 πολυφασματικά

κανάλια που καλύπτουν το ίδιο φασματικό εύρος. Επίσης, διαφέρουν στη χωρική και χρονική ανάλυση, καθώς ο WorldView-2 έχει ανάλυση 0,5 m στο παγχρωματικό κανάλι και 2 m στα πολυφασματικά κανάλια και η συχνότητα επανεπίσκεψής του είναι 1,1 ημέρες.

Από την εταιρεία DigitalGlobe παρασχέθηκε στο Εργαστήριο Τηλεπισκόπησης Σ.Α.Τ.Μ. μία παγχρωματική και μία πολυφασματική εικόνα, που απεικονίζουν μία περιοχή στην Κρήτη και συγκεκριμένα στο νομό Ηρακλείου. Η λήψη αυτής της εικόνας έγινε λίγες μέρες νωρίτερα από τις παραπάνω έξι εικόνες, πιο συγκεκριμένα στις 11 Ιουλίου 2017. Το γεωδαιτικό σύστημα αναφοράς που χρησιμοποιείται στην εικόνα είναι το WGS 84 (World Geodetic System).



Εικόνα 3.3 – Τμήμα της δορυφορικής εικόνας WorldView-2 για την περιοχή μελέτης της Κρήτης σε φυσικό έγχρωμο σύνθετο.

Στον ακόλουθο πίνακα παρουσιάζονται τα βασικά χαρακτηριστικά και μεταδεδομένα των επτά δορυφορικών εικόνων που χρησιμοποιήθηκαν.

Δορυφορική Εικόνα	Δορυφόρος	Αριθμός καναλιών	Ημερομηνία Λήψης	Γραμμές * Στήλες (pixels)
Αμύνταιο	WV-3	8 (Multi) 1 (Pan)	29 Ιουλίου 2017	7326 * 3514 29304 * 14056
Δράμα	WV-3	8 (Multi) 1 (Pan)	29 Ιουλίου 2017	4046 * 10030 16184 * 40120
Επανομή	WV-3	8 (Multi) 1 (Pan)	29 Ιουλίου 2017	1516 * 1513 6064 * 6052
Καλή Βρύση	WV-3	8 (Multi) 1 (Pan)	29 Ιουλίου 2017	1716 * 2592 6864 * 10368
Μαντινεία	WV-3	8 (Multi) 1 (Pan)	29 Ιουλίου 2017	1202 * 1363 4808 * 5452
Νάουσα	WV-3	8 (Multi) 1 (Pan)	29 Ιουλίου 2017	10660 * 8469 42640 * 33876
Κρήτη	WV-2	8 (Multi) 1 (Pan)	11 Ιουλίου 2017	1952 * 1282 7808 * 5128

Πίνακας 3.2 – Βασικά χαρακτηριστικά και Μεταδεδομένα των δορυφορικών εικόνων.

3.2 Προεπεξεργασίες Δεδομένων

Οι προεπεξεργασίες των δορυφορικών εικόνων είχαν στόχο τη βελτίωση ορισμένων χαρακτηριστικών των εικόνων και την κατάλληλη προετοιμασία τους για τις βασικές μεθόδους επεξεργασίας που ακολούθησαν. Στις προεπεξεργασίες περιλαμβάνονται η ραδιομετρική και ατμοσφαιρική διόρθωση των πολυφασματικών δορυφορικών εικόνων και η συγχώνευση (pan-sharpening) των πολυφασματικών εικόνων με τις παγχρωματικές. Ακολούθησε η παραγωγή δεδομένων ελέγχου (ground truth) μέσω ψηφιοποίησης, για τον εντοπισμό και την οριοθέτηση της θέσης των αμπελοτεμαχίων.

3.2.1 Ραδιομετρική και Ατμοσφαιρική διόρθωση εικόνων

Κατά τη διαδικασία της ατμοσφαιρικής διόρθωσης γίνονται οι απαραίτητες διορθώσεις στις δορυφορικές εικόνες, πριν την περαιτέρω ανάλυσή τους, για την εξάλειψη της αλλοίωσης που προκαλείται στην ακτινοβολία λόγω της παρεμβολής της ατμόσφαιρας μεταξύ δορυφορικού δέκτη και γήινης επιφάνειας.

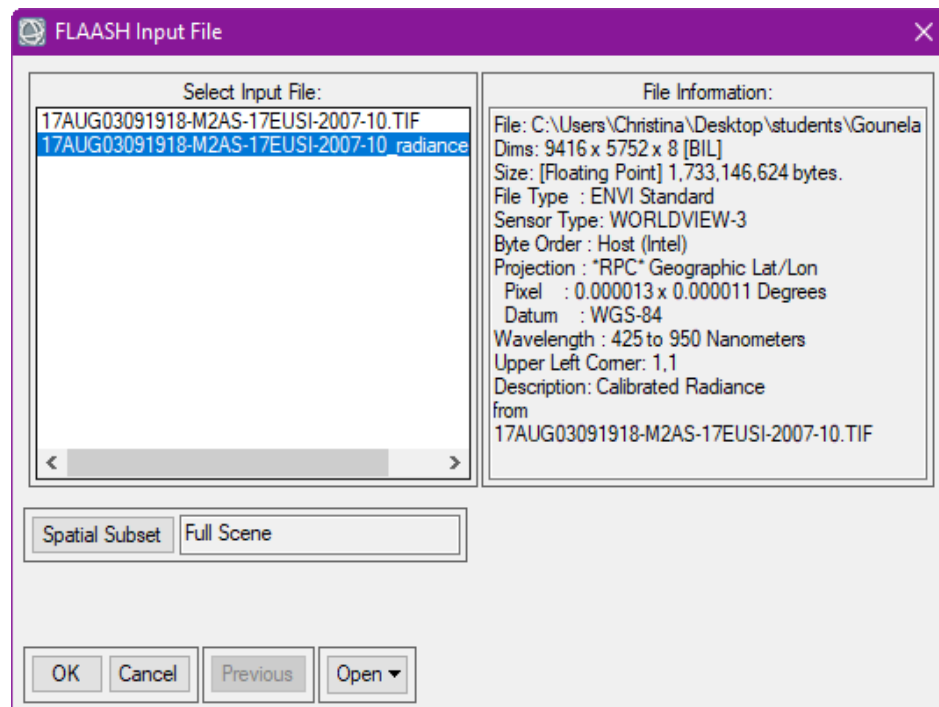
Η ατμόσφαιρα που παρεμβάλλεται μεταξύ γήινης επιφάνειας και δορυφόρου επηρεάζει την πορεία της ηλιακής ακτινοβολίας που ανακλάται από μία επιφάνεια. Ως εκ τούτου, μέρος της ηλιακής ακτινοβολίας σκεδάζεται, ένα άλλο μέρος απορροφάται από άλλες επιφάνειες και το υπόλοιπο φτάνει στο δορυφορικό αισθητήρα. Επιπρόσθετα, η ηλιακή ακτινοβολία κατά την διέλευσή της από την ατμόσφαιρα σκεδάζεται, με αποτέλεσμα να φτάνει στο έδαφος τόσο η άμεση όσο και η διάχυτη στην ατμόσφαιρα ηλιακή ακτινοβολία. Κατά την αντίστροφη πορεία, η διάχυτη ηλιακή ακτινοβολία ανακλάται στην ατμόσφαιρα και σε νέφη και φτάνει στο δορυφορικό δέκτη. Επομένως, η ακτινοβολία που φτάνει στο δορυφορικό αισθητήρα αποτελεί το άθροισμα των παραπάνω συνιστωσών.

Σκοπός της ατμοσφαιρικής διόρθωσης των πολυφασματικών δορυφορικών εικόνων είναι η βελτίωση της ποιότητας των τηλεπισκοπικών δεδομένων, μέσω της παραγωγής εικόνων ανακλαστικότητας (reflectance). Με αυτό τον τρόπο αναστέλλονται οι επιδράσεις της ατμόσφαιρας στην ανακλώμενη ακτινοβολία, από την οποία προκύπτει η πρωτογενής εικόνα του δορυφορικού αισθητήρα. Η ατμοσφαιρική διόρθωση υλοποιείται με χρήση κάποιων πολυπαραμετρικών αλγορίθμων, που στοχεύουν στην εκτίμηση των ατμοσφαιρικών επιδράσεων.

Πριν την ατμοσφαιρική διόρθωση έγινε η ραδιομετρική διόρθωση των πολυφασματικών εικόνων, η οποία αφορά στην εξάλειψη θορύβου ή σφαλμάτων που οφείλονται στο σύστημα αισθητήρων ή στο περιβάλλον. Οι αρνητικές επιδράσεις αφαιρέθηκαν μέσω της ραδιομετρικής βαθμονόμησης (radiometric calibration), έτσι ώστε οι πρωτογενείς ψηφιακές τιμές (digital numbers) που αντιπροσωπεύουν τη σχετική ακτινοβολία (relative radiance) να μετατραπούν σε τιμές απόλυτης ακτινοβολίας (absolute radiance).

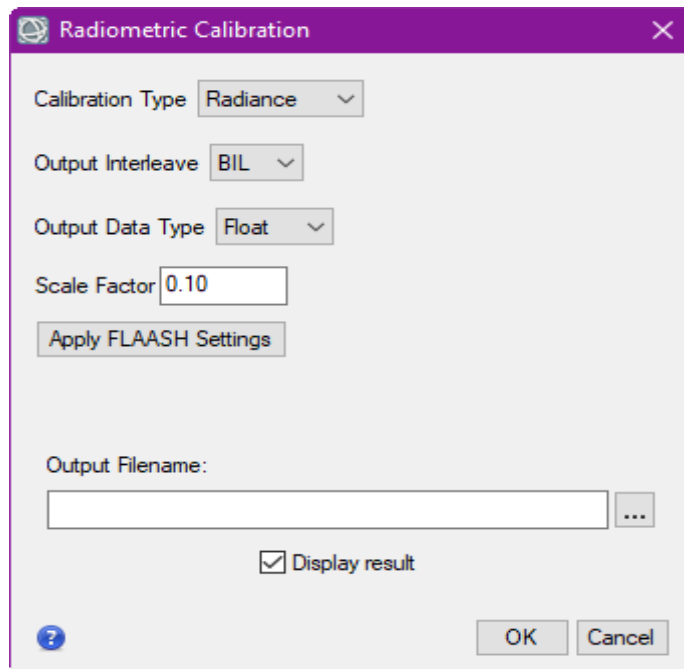
Στην παρούσα εργασία, η ραδιομετρική και ατμοσφαιρική διόρθωση για τις πολυφασματικές δορυφορικές εικόνες υλοποιήθηκε στο λογισμικό ENVI (Version 5.5.1). Για την ατμοσφαιρική διόρθωση χρησιμοποιήθηκε το εργαλείο FLAASH (Fast Line-of-sight Atmospheric Analysis of Hypercubes). Παρακάτω παρατίθενται τα βήματα που ακολουθήθηκαν στο περιβάλλον ENVI για τη ραδιομετρική και την ατμοσφαιρική διόρθωση των τηλεπισκοπικών εικόνων.

1. Εισαγωγή της πολυφασματικής εικόνας στο περιβάλλον ENVI.



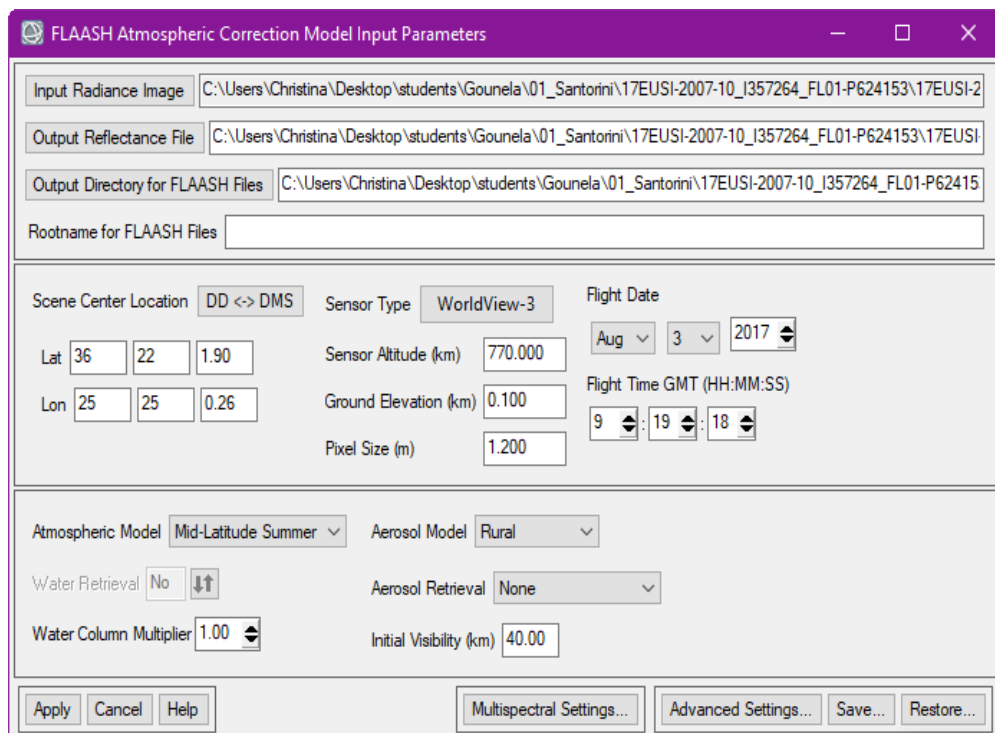
Εικόνα 3.4. Στιγμιότυπο από την εισαγωγή εικόνας στο ENVI.

2. Ραδιομετρική διόρθωση με χρήση του αρχείου μεταδεδομένων της πολυφασματικής εικόνας και παραγωγή εικόνας σε Floating Point και σε μονάδες $[(\mu W) / (cm^2 * nm * sr)]$. Παράλληλα, μετατροπή της εικόνας σε αρχείο τύπου BIL, ώστε να είναι κατάλληλη για εισαγωγή στο FLAASH.



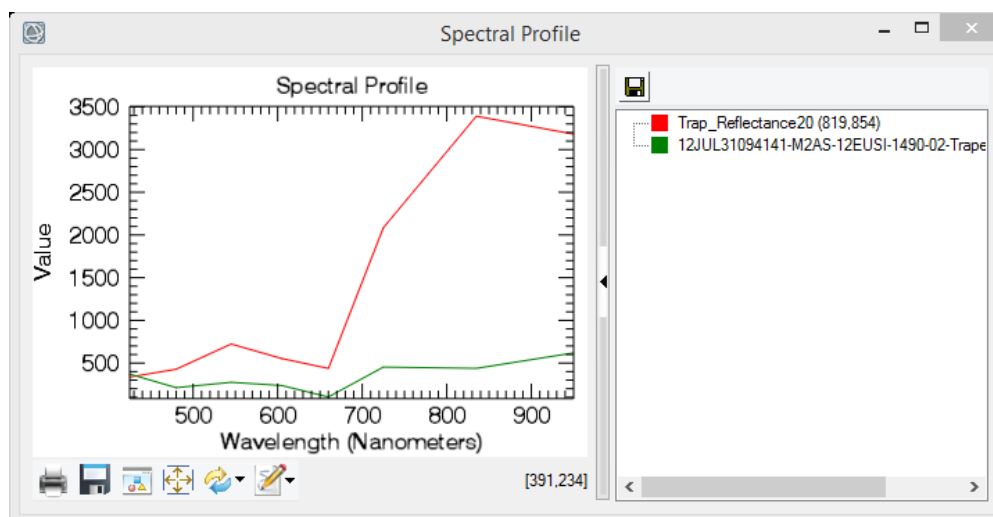
Εικόνα 3.5. Στιγμιότυπο από τη ραδιομετρική διόρθωση της πολυφασματικής εικόνας στο ENVI.

3. Ατμοσφαιρική διόρθωση της πολυφασματικής εικόνας με το εργαλείο FLAASH και την κατάλληλη παραμετροποίηση.



Εικόνα 3.6. Στιγμιότυπο από το εργαλείο FLAASH και την κατάλληλη παραμετροποίηση για την ατμοσφαιρική διόρθωση πολυφασματικής εικόνας στο λογισμικό ENVI.

4. Έλεγχος της αποτελεσματικότητας της ατμοσφαιρικής διόρθωσης με το εργαλείο Spectral Profile, με το οποίο συγκρίνονται οι καμπύλες της αρχικής εικόνας και της ατμοσφαιρικά διορθωμένης εικόνας για ένα εικονοστοιχείο υγιούς βλάστησης. Για να είναι επιτυχής η ατμοσφαιρική διόρθωση πρέπει η τιμή του εικονοστοιχείου στο κανάλι Blue να είναι μικρότερη από τις τιμές στα κανάλια Green και Red.



Εικόνα 3.7. Στιγμιότυπο από το εργαλείο Spectral Profile, όπου η κόκκινη καμπύλη απεικονίζει τις τιμές του εικονοστοιχείου μετά την ατμοσφαιρική διόρθωση και η πράσινη τις τιμές στην αρχική πολυφασματική εικόνα.

Για τη διαδικασία της ατμοσφαιρικής διόρθωσης έγιναν αρκετές δοκιμές στην παραμετροποίηση, ώστε να αναδειχθεί η κατάλληλη ατμοσφαιρική διόρθωση για κάθε περιοχή. Οι δοκιμές κυρίως πειραματίστηκαν με την παράμετρο Initial Visibility, που σχετίζεται με την καθαρότητα της εικόνας και την παρουσία νεφών σε αυτή.

Αμύνταιο WV3 2017

RAW



ATM. COR. (I.V. 30)



Δράμα WV3 2017

RAW



ATM. COR. (I.V. 40)



Επανομή WV3 2017

RAW



ATM. COR. (I.V. 40)



Καλή Βρύση Δράμας WV3 2017

RAW



ATM. COR. (I.V. 40)



Μαντινεία Τρίπολης WV3 2017

RAW



ATM. COR. (I.V. 40)



Νάουσα WV3 2017

RAW



ATM. COR. (I.V. 30)



Κρήτη WV2 2017

RAW



ATM. COR. (I.V. 30)



Εικόνα 3.8. Στιγμιότυπα από της αρχικές (αριστερά) και της ατμοσφαιρικά διορθωμένες πολυφασματικές εικόνες (δεξιά) του δορυφόρου WV3.

Η ραδιομετρική και η ατμοσφαιρική διόρθωση εφαρμόστηκε στις πολυφασματικές εικόνες των επτά περιοχών μελέτης και επιπλέον σε άλλες δύο πολυφασματικές εικόνες του δορυφορικού αισθητήρα WorldView-3, που απεικονίζουν τμήματα των περιοχών της Νεμέας και του Πύργου. Λόγω τεχνικών προβλημάτων που παρουσίασαν οι δύο προαναφερθείσες εικόνες, οι περιοχές αυτές δε συμπεριλήφθηκαν στις παρακάτω εργασίες και δεν αποτέλεσαν περιοχές μελέτης.

3.2.2 Συγχώνευση πολυφασματικής και παγχρωματικής εικόνας (Pan-sharpening)

Ως Συγχώνευση εικόνας (Image fusion) ορίζεται η διαδικασία συνδυασμού δύο ή περισσότερων εικόνων σε μία τελική παράγωγη εικόνα. Η συγχώνευση εικόνων μπορεί να εφαρμοστεί σε εικόνες από διαφορετικούς δέκτες (multi-sensor data fusion), σε διαφορετικού τύπου εικόνες (π.χ. οπτικές με SAR) και στην πολυφασματική με την παγχρωματική εικόνα (pan-sharpening).

Με τον όρο Pan-sharpening περιγράφεται η συγχώνευση της παγχρωματικής εικόνας υψηλής χωρικής ανάλυσης με την πολυφασματική εικόνα χαμηλής χωρικής ανάλυσης με σκοπό την παραγωγή μίας εικόνας, η οποία θα φέρει περισσότερη πληροφορία, καθώς συνδυάζει την υψηλή φασματική ανάλυση της πολυφασματικής εικόνας με την υψηλή χωρική ανάλυση της παγχρωματικής εικόνας. Το pan-sharpening είναι μία pixel-by-pixel διαδικασία και εφαρμόζεται σε εικόνες από τον ίδιο δέκτη που έχουν ληφθεί στον ίδιο χρόνο (Yuhendra et al., 2012).

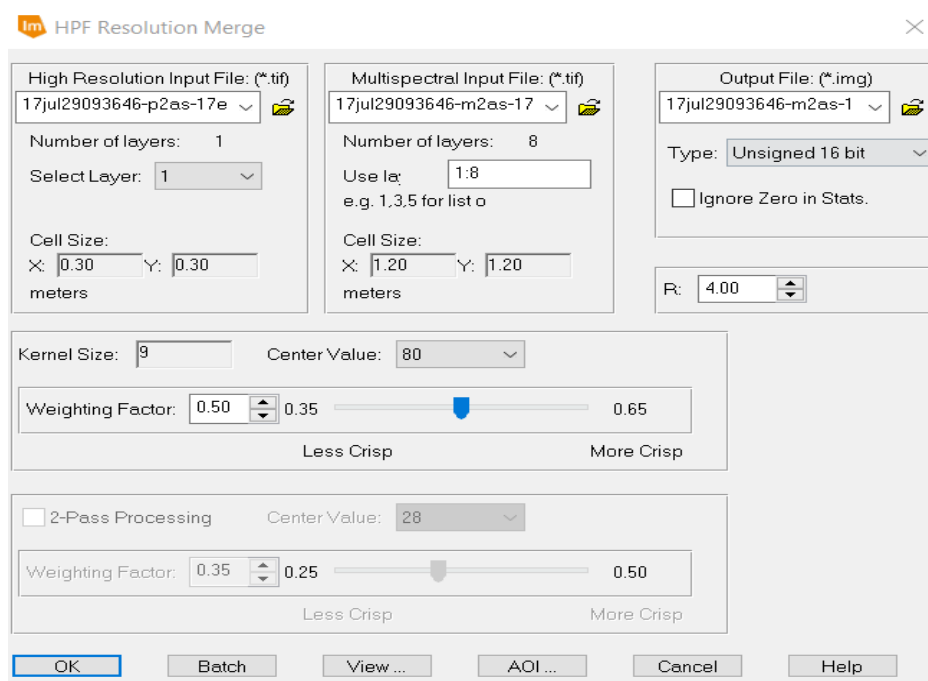
Στην προκειμένη εργασία χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό ERDAS IMAGINE 2015 για τη συγχώνευση των εικόνων. Για τη συγχώνευση πρέπει οι πολυφασματικές εικόνες και οι παγχρωματικές εικόνες να είναι στον ίδιο μορφότυπο. Οι ατμοσφαιρικά διορθωμένες πολυφασματικές εικόνες που παρήχθησαν από το FLAASH ήταν σε μορφή 16bit signed integer και μετατράπηκε το format τους σε 16bit unsigned integer, ώστε να είναι στο ίδιο format με τις παγχρωματικές. Οι πολυφασματικές και παγχρωματικές εικόνες που χρησιμοποιήθηκαν στην προκειμένη εργασία έχουν ληφθεί από τον ίδιο αισθητήρα (sensor) και την ίδια στιγμή. Η διαδικασία ξεκίνησε με την επαναδειγματοληψία (resampling) της πολυφασματικής εικόνας στην παγχρωματική, προκειμένου οι υπό συγχώνευση εικόνες να αποκτήσουν το ίδιο μέγεθος εικονοστοιχείου (pixel). Στη συνέχεια ακολούθησαν οι μαθηματικοί μετασχηματισμοί, που σχετίζονται με τη μέθοδο που εφαρμόζεται.

Το λογισμικό προσφέρει διαφορετικές μεθόδους για τη συγχώνευση εικόνων. Από αυτές εφαρμόστηκε η μέθοδος High Pass Filter (HPF). Η μέθοδος HPF βασίζεται στη μεταφορά λεπτομερειών υψηλής χωρικής ανάλυσης που έχουν εξαχθεί από την παγχρωματική εικόνα, στην πολυφασματική εικόνα που έχει υποστεί resampling (Schowengerdt, 1998). Για την υλοποίηση της συγχώνευσης υλοποιείται μία συνέλιξη χρησιμοποιώντας ένα υπεραπλοποιημένο φίλτρο (HPF) στα δεδομένα υψηλής χωρικής ανάλυσης, τα οποία ακολούθως συνδυάζονται με τα πολυφασματικά δεδομένα χαμηλότερης χωρικής ανάλυσης.

Τα στάδια του αλγόριθμου HPF μπορούν να περιγραφούν ως ακολούθως (Βαϊόπουλος, 2013):

1. Προσδιορισμός του λόγου R ανάλυσης των εικόνων, για επιλογή σωστού μεγέθους φίλτρου ($R = \text{ανάλυση παγχρωματικής εικόνας} / \text{ανάλυση πολυφασματικής εικόνας}$).
2. Εφαρμογή φίλτρου υψηλής διέλευσης (HPF) στην παγχρωματική εικόνα.
3. Αναδειγματοληψία (resampling) της πολυφασματικής εικόνας στην ανάλυση της παγχρωματικής.
4. Προσθήκη της εικόνας υψηλής διέλευσης (εικόνα HPF) σε κάθε αναδειγματοποιημένη φασματική εικόνα (κανάλι). Η εικόνα HPF προστίθεται με συντελεστή ανάλογο της ολικής τυπικής απόκλισης του κάθε φασματικού καναλιού.
5. Έλκυση της νέας πολυφασματικής εικόνας, ώστε να τείνει προς τη μέση τιμή και την τυπική απόκλιση της αρχικής πολυφασματικής εικόνας.

Το σημαντικό πλεονέκτημα της μεθόδου HPF είναι η χωρική βελτίωση που επιφέρει στην υπό συγχώνευση εικόνα. Ένα μειονέκτημα της μεθόδου είναι ο υπερτονισμός των ακμών, όμως στην παρούσα εργασία αποτέλεσε πλεονέκτημα, καθώς στόχος ήταν η καλύτερη δυνατή απεικόνιση των αμπελιών που ακολουθούν γραμμικό πρότυπο. Η ενίσχυση αυτού του χαρακτηριστικού αποτέλεσε βασικό στόχο της συγχώνευσης των εικόνων, έτσι ώστε η εφαρμογή της ακόλουθης μεθοδολογίας για το διαχωρισμό των γραμμών φύτευσης των αμπελιών από το έδαφος να είναι αποτελεσματική.



Εικόνα 3.9. Στιγμιότυπο από το εργαλείο Pan-sharpen – HPF Resolution Merge και την παραμετροποίηση για το pan-sharpening εικόνων στο περιβάλλον ERDAS.

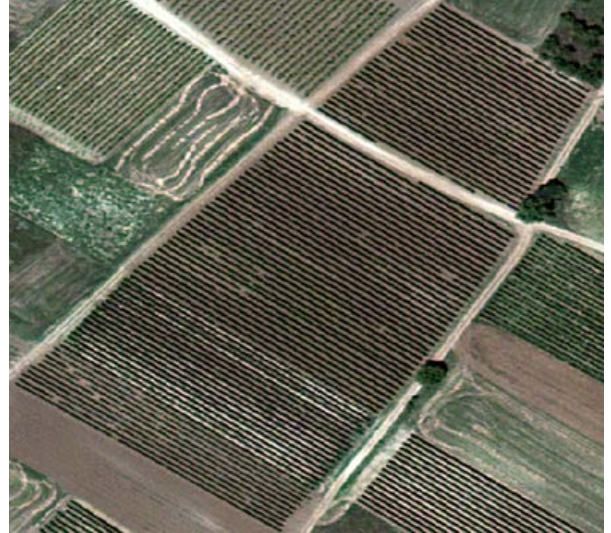
Ακολούθως, παρουσιάζονται οι ατμοσφαιρικά διορθωμένες πολυφασματικές εικόνες που χρησιμοποιήθηκαν για τη συγχώνευση και οι συγχωνευμένες εικόνες (pan-sharpened) που προέκυψαν με τη μέθοδο HPF.

Αμύνταιο WV3 2017

Ατμοσφαιρικά Διορθωμένη



HPF Pan-sharpened



Δράμα WV3 2017

Ατμοσφαιρικά Διορθωμένη

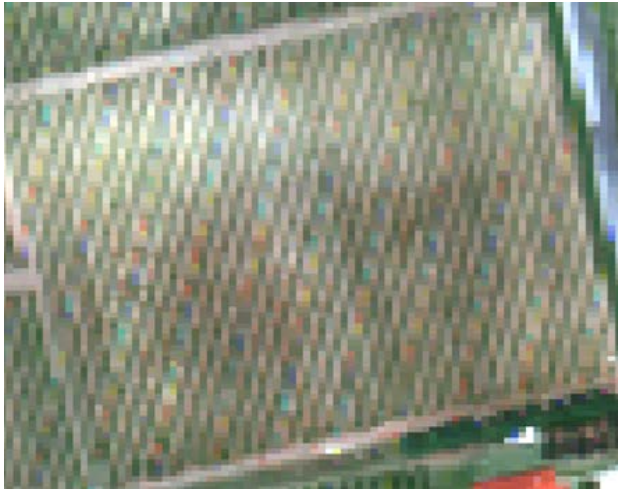


HPF Pan-sharpened



Επανομή WV3 2017

Ατμοσφαιρικά Διορθωμένη



HPF Pan-sharpened

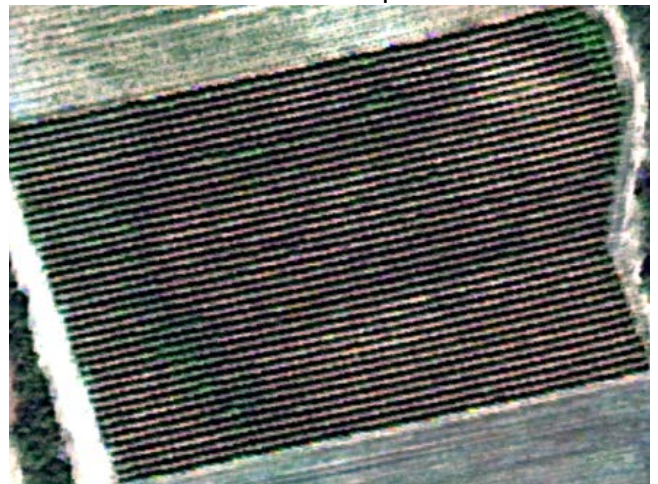


Καλή Βρύση Δράμας WV3 2017

Ατμοσφαιρικά Διορθωμένη



HPF Pan-sharpened



Μαντινεία Τρίπολης WV3 2017

Ατμοσφαιρικά Διορθωμένη



HPF Pan-sharpened



Κρήτη WV2 2017

Ατμοσφαιρικά Διορθωμένη



HPF Pan-sharpened



Εικόνα 3.10. Στιγμιότυπα από τις ατμοσφαιρικά διορθωμένες πολυφασματικές εικόνες (αριστερά) και τις συγχωνευμένες (HPF Pan-sharpened) εικόνες (δεξιά).

Μόνο για την περιοχή της Νάουσας χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό PanFusion (Vaiopoulos A., Panfusion: Image fusion - Pansharp App, 2017), καθώς λόγω του μεγάλου μεγέθους της ατμοσφαιρικά διορθωμένης πολυφασματικής εικόνας της περιοχής δεν ήταν δυνατό να υλοποιηθεί η συγχώνευση στο λογισμικό ERDAS. Το PanFusion είναι ένα πρόγραμμα που υλοποιεί συγχώνευση παγχρωματικής και πολυφασματικής εικόνας με 18 διαφορετικούς αλγόριθμους. Από αυτούς επιλέχθηκε ο HPF να εφαρμοστεί στην ατμοσφαιρικά διορθωμένη πολυφασματική εικόνα της Νάουσας, όπως συνέβη και για τις υπόλοιπες περιοχές.

Νάουσα WV3 2017

Ατμοσφαιρικά Διορθωμένη



HPF Pan-sharpened



Εικόνα 3.11. Στιγμιότυπο από την ατμοσφαιρικά διορθωμένη πολυφασματική εικόνα (αριστερά) της Νάουσας και τη συγχωνευμένη (HPF Pan-sharpened) εικόνα (δεξιά).

Από την πρώτη προσπάθεια υλοποίησης Pan-sharpening στις δορυφορικές εικόνες WorldView-3 και WorldView-2 προέκυψε ένα πρόβλημα, το οποίο σχετίζεται με τον περιορισμό που θέτει το λογισμικό ERDAS Imagine 2015 για τον τύπο αποθήκευσης των εικόνων. Για να εισαχθούν η παγχρωματική και η πολυφασματική εικόνα στο ERDAS και να εφαρμοστεί σε αυτές κάποιος αλγόριθμος πρέπει να έχουν το ίδιο format. Στην προκειμένη περίπτωση κάθε ζευγάρι εικόνων αποθηκεύτηκε σε uint16, με αποτέλεσμα και η παραγόμενη από το Pan-sharpening εικόνα να αποθηκεύεται σε uint16. Ο μορφότυπος uint16 (unsigned integer 16bit) αποθηκεύει μόνο θετικές τιμές στο εύρος [0, 65535]. Απόρροια αυτού του περιορισμού ήταν η αντικατάσταση των αρνητικών τιμών που προέκυπταν από τον αλγόριθμο HPF σε κάποια pixel της εικόνας με no-data (καμία τιμή). Επομένως, η pan-sharpened εικόνα είχε pixel τόσο στα πλαίσια της σκηνής όσο και στο background που δεν έφεραν τιμή και θα παρεμπόδιζαν τις μετέπειτα επεξεργασίες και την ανίχνευση των αμπελιών. Το ίδιο πρόβλημα παρουσιάστηκε και στην εικόνα της Νάουσας, που είχε υποστεί επεξεργασία με το λογισμικό PanFusion, καθώς ο μορφότυπος που χρησιμοποιήθηκε για την ατμοσφαιρικά διορθωμένη πολυφασματική εικόνα και την παγχρωματική εικόνα ήταν uint16.

Για την επίλυση αυτού του ζητήματος επαναλήφθηκε η προεπεξεργασία του Pan-sharpening σε όλες τις εικόνες με εφαρμογή του αλγορίθμου HPF μέσω της γλώσσας προγραμματισμού Python. Επιλέχθηκε αυτή η μεθοδολογία διότι παρέχει τη δυνατότητα μετατροπής της μορφής αποθήκευσης της παγχρωματικής και της πολυφασματικής εικόνας από uint16 σε float32, σύμφωνα με την οποία τα pixel της εικόνας μπορούν να λάβουν θετικές ή αρνητικές δεκαδικές τιμές. Με αυτό τον τρόπο αποθηκεύτηκαν οι αρνητικές τιμές που προέκυψαν από την εφαρμογή του αλγορίθμου στην παραγόμενη εικόνα.

Στη συνέχεια, υπολογίστηκε η ελάχιστη τιμή για κάθε κανάλι της εικόνας (αποκλείοντας τις τιμές του background) και επιλέχθηκε η μικρότερη τιμή από αυτές ως η ελάχιστη τιμή όλης της εικόνας. Η απόλυτη τιμή της ελάχιστης τιμής προσαυξημένη κατά μία μονάδα προστέθηκε σε όλα τα pixel και σε όλα τα κανάλια της εικόνας. Αποτέλεσμα αυτής της ενέργειας ήταν σε όλα τα κανάλια υπήρχαν αρνητικές τιμές, αυτές να εξαλειφθούν και το ιστόγραμμα της εικόνας να μετατοπιστεί προς τα δεξιά (θετικό εύρος τιμών) χωρίς να επηρεάζεται η φασματική συμπεριφορά (καμπύλη) της εικόνας.

Ακολούθως περιγράφονται τα στάδια που υλοποιήθηκαν στην Python για την επανεκτέλεση του pan-sharpening στις εικόνες:

1. Εισαγωγή της ατμοσφαιρικά διορθωμένης πολυφασματικής και της παγχρωματικής εικόνας στην Python με γεωαναφορά, δηλαδή οι εικόνες εισάγονται με την πληροφορία των συντεταγμένων τους, το προβολικό τους σύστημα και τον τύπο του αρχείου τους.
2. Αλλαγή της χωρικής ανάλυσης της ατμοσφαιρικά διορθωμένης πολυφασματικής εικόνας, ώστε να έχει τις ίδιες διαστάσεις (στήλες, γραμμές)

με την παγχρωματική. Χρησιμοποιήθηκε η βιβλιοθήκη cv2 της Python και συγκεκριμένα η εντολή `resize` (`cv2.resize`).

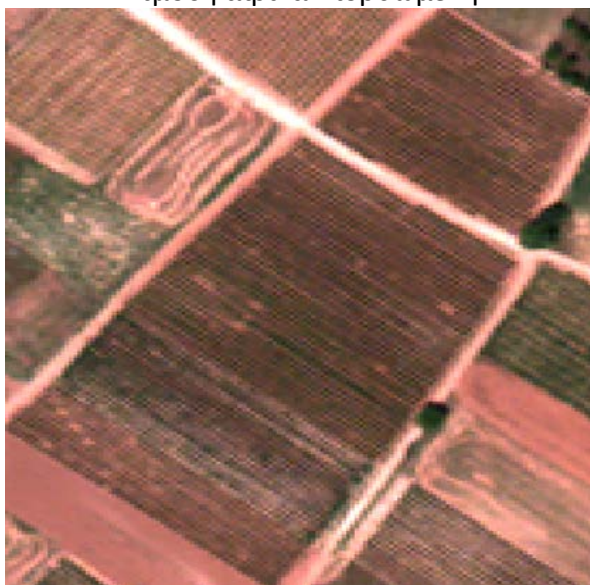
3. Εκτέλεση `ran-sharpening` με τον αλγόριθμο HPF. Η παράμετρος που διαφέρει σε κάθε εικόνα είναι το `ratio`, το οποίο ορίζεται ως ο λόγος της χωρικής ανάλυσης της ατμοσφαιρικά διορθωμένης πολυφασματικής εικόνας προς τη χωρική ανάλυση της πολυφασματικής εικόνας.
4. Υπολογισμός της ελάχιστης τιμής όλων των καναλιών της εικόνας και επιλογή της μικρότερης τιμής εξ αυτών. Πρόσθεση της απόλυτης τιμής της ελάχιστης τιμής προσαυξημένης με μία μονάδα σε όλα τα `pixel` και σε όλα τα κανάλια κάθε `pixel`.
5. Αποθήκευση του τελικού αποτελέσματος σε `float32` με γεωαναφορά, χρησιμοποιώντας το προβολικό σύστημα της παγχρωματικής εικόνας.

Η παραπάνω διαδικασία τελέστηκε για καθεμία από τις εικόνες, εκτός από τις περιοχές του Αμυνταίου, της Δράμας και της Νάουσας που λόγω πολύ μεγάλων διαστάσεων δεν ήταν εφικτή η εφαρμογή του HPF σε ολόκληρη την εικόνα. Για αυτές τις τρεις περιοχές η παραπάνω μεθοδολογία προσαρμόστηκε. Καθεμία από τις προαναφερθείσες εικόνες διαιρέθηκε σε τμήματα για να τρέξει ο αλγόριθμος HPF σε κάθε τμήμα ξεχωριστά. Οι παράμετροι που συμπεριλήφθηκαν για τη διαίρεση κάθε εικόνας είναι ο λόγος της χωρικής ανάλυσης της ατμοσφαιρικά διορθωμένης πολυφασματικής και της παγχρωματικής εικόνας, ανά πόσες γραμμές διαιρείται η εικόνα για να εφαρμοστεί ο αλγόριθμος και το πλήθος των `pixel` που χρησιμοποιούνται για την παρεμβολή στην οποία υπόκεινται οι τιμές των `pixel`. Μετά την εφαρμογή του αλγορίθμου, προστέθηκε η απόλυτη τιμή της ελάχιστης τιμής ολόκληρης της εικόνας προσαυξημένη κατά μία μονάδα στο σύνολο των `pixel` και σε όλα τα κανάλια κάθε `pixel`. Το τελικό αποτέλεσμα του `ran-sharpening` για κάθε περιοχή αποθηκεύτηκε σε `float32` με γεωαναφορά, ομοίως με τις υπόλοιπες περιοχές.

Παρακάτω παρουσιάζονται οι ατμοσφαιρικά διορθωμένες πολυφασματικές εικόνες και οι `ran-sharpened` εικόνες, όπως αυτές προέκυψαν από την εφαρμογή του αλγορίθμου HPF μέσω της γλώσσας προγραμματισμού Python.

Αμύνταιο WV3 2017

Ατμοσφαιρικά Διορθωμένη



Pan-sharpened



Δράμα WV3 2017

Ατμοσφαιρικά Διορθωμένη

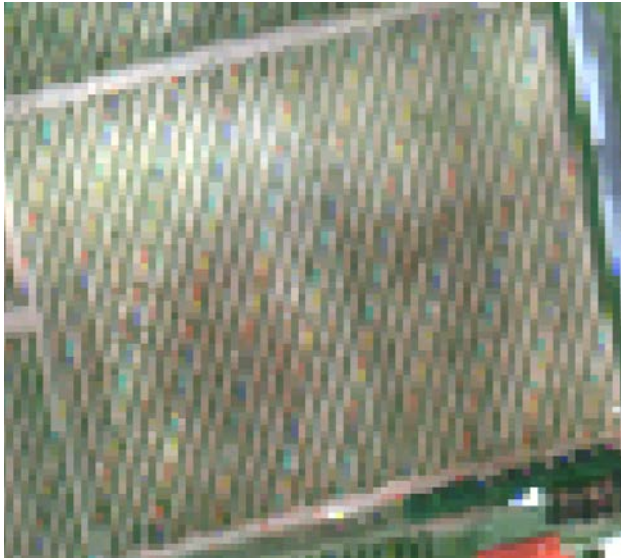


Pan-sharpened



Επανομή WV3 2017

Ατμοσφαιρικά Διορθωμένη

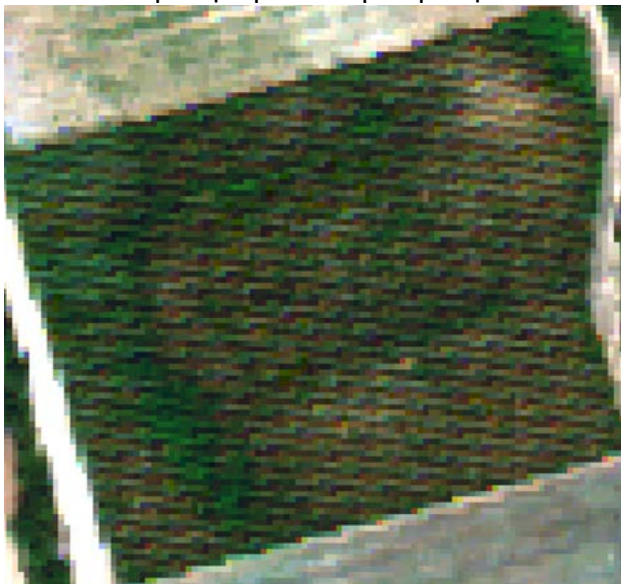


Pan-sharpened

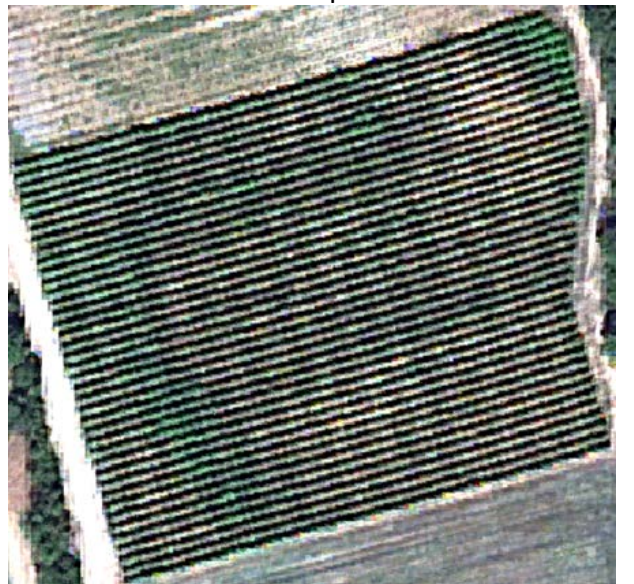


Καλή Βρύση Δράμας WV3 2017

Ατμοσφαιρικά Διορθωμένη

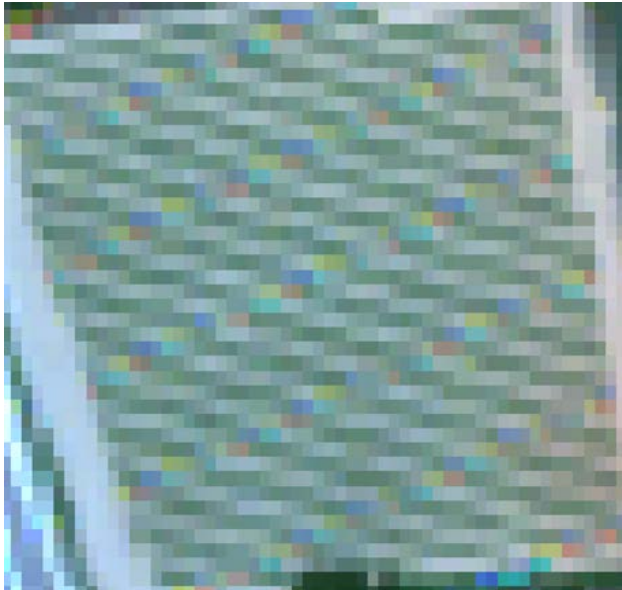


Pan-sharpened



Μαντινεία Τρίπολης WV3 2017

Ατμοσφαιρικά Διορθωμένη



Pan-sharpened



Νάουσα WV3 2017

Ατμοσφαιρικά Διορθωμένη



Pan-sharpened



Ατμοσφαιρικά Διορθωμένη



Pan-sharpened



Εικόνα 3.12. Στιγμιότυπα από τις ατμοσφαιρικά διορθωμένες πολυφασματικές εικόνες (αριστερά) και τις συγχωνευμένες (HPF Pan-sharpened) εικόνες (δεξιά).

Μετά το πέρας του pan-sharpening από το οποίο προέκυψαν τα τελικά αποτελέσματα, η δορυφορική εικόνα της περιοχής μελέτης της Νάουσας κατείχε πολύ μεγάλο όγκο αποθήκευσης. Για το λόγο αυτό επιλέχθηκαν οι δύο περιοχές της εικόνας με τη μεγαλύτερη σπουδαιότητα για τους σκοπούς της εργασίας (αμπελουργικές περιοχές). Αυτά τα δύο τμήματα κόπηκαν από την εικόνα, ώστε να είναι διαχειρίσιμα στις μετέπειτα επεξεργασίες. Στο εξής οι περιοχές αυτές θα αναφέρονται ως Νάουσα 1 (Γιαννακοχώρι Νάουσας) και Νάουσα 2 (Στενήμαχος Νάουσας).

3.2.3 Ανακατανομή Ιστογράμματος Εικόνων (Rescale)

Μετά την υλοποίηση του Pan-sharpening στις δορυφορικές εικόνες και την πρόσθεση της απόλυτης τιμής της ελάχιστης τιμής της εικόνας σε κάθε *pixel*, η φασματική συμπεριφορά της εικόνας για καθένα από τα οκτώ πολυφασματικά κανάλια είχε στρεβλωθεί. Το ιστόγραμμα της εικόνας είχε μετατοπιστεί προς τα δεξιά, καθώς είχε προστεθεί η ίδια τιμή σε όλα τα κανάλια, με αποτέλεσμα να έχει αλλάξει η φασματική απόκριση κάθε καναλιού συγκριτικά με το ιστόγραμμα της ατμοσφαιρικά διορθωμένης πολυφασματικής εικόνας. Το ιστόγραμμα μιας εικόνας είναι ένα σημαντικό εργαλείο κατά την επεξεργασία της, καθώς αποτελεί τη γραφική αναπαράσταση της κατανομής των εντάσεων των εικονοστοιχείων της.

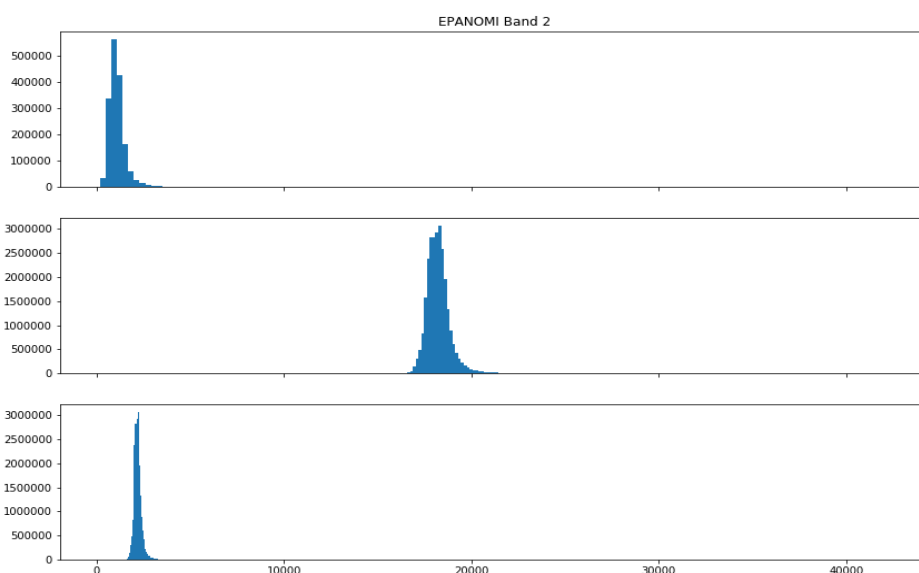
Για τη διόρθωση αυτής της αστοχίας και τη διατήρηση της φασματικής πληροφορίας που παρέχουν οι πολύ υψηλής χωρικής ανάλυσης δορυφορικές εικόνες, πραγματοποιήθηκε ανακατανομή (Rescale) του ιστογράμματος της pan-sharpened εικόνας. Για την εφαρμογή του Rescale χρησιμοποιήθηκαν η ατμοσφαιρικά διορθωμένη πολυφασματική εικόνα και η pan-sharpened εικόνα κάθε περιοχής,

ώστε το ιστόγραμμα της δεύτερης να μετατοπιστεί περίπου στο ίδιο εύρος τιμών με το ιστόγραμμα της πρώτης.

Πριν γίνει αυτή η μετατόπιση ιστογράμματος και για την ορθότερη έκβαση αυτής της ενέργειας, αποκλείστηκαν από την επεξεργασία οι τιμές των εικονοστοιχείων του background της ατμοσφαιρικά διορθωμένης εικόνας και της ran-sharpened εικόνας. Εντοπίστηκε η συχνότερη τιμή κάθε εικόνας, η οποία αποτελεί την τιμή του background και σε όσα pixel υπήρχε αυτή η τιμή αντικαταστάθηκε με μηδέν. Στη συνέχεια, δημιουργήθηκε μία μάσκα με χρήση της βιβλιοθήκης Numpy της Python, μέσω της οποίας διατηρήθηκαν μόνο οι τιμές της σκηνής κάθε εικόνας και αποκλείστηκαν από την παρακάτω διαδικασία τα pixel με τιμή μηδέν.

Στη συνέχεια, πραγματοποιήθηκε αποκοπή των άκρων στα ιστογράμματα της ατμοσφαιρικά διορθωμένης πολυφασματικής εικόνας και της ran-sharpened εικόνας. Για την ενέργεια αυτή έγινε χρήση της εντολής percentile της βιβλιοθήκης Numpy και αποκόπηκαν τα άκρα σε ποσοστό 1% και 99% αντίστοιχα. Τέλος, έγινε η μετατόπιση του ιστογράμματος της ran-sharpened εικόνας, ώστε να καλύπτει περίπου το ίδιο εύρος τιμών με το ιστόγραμμα της ατμοσφαιρικά διορθωμένης πολυφασματικής εικόνας και προέκυψε η rescaled εικόνα για κάθε περιοχή μελέτης.

Στις rescaled εικόνες που παρήχθησαν από την παραπάνω επεξεργασία, οι τιμές των εικονοστοιχείων των αμπελιών κυμαίνονται σε χαμηλό εύρος τιμών όπως διαπιστώθηκε μετά από παρατήρηση του αποτελέσματος.



Εικόνα 3.13. Ενδεικτικό στιγμιότυπο Ανακατανομής Ιστογράμματος στο κανάλι 2 (Μπλε) στην περιοχή της Επανομής. Πρώτο σχήμα: ιστόγραμμα ατμοσφαιρικά διορθωμένης πολυφασματικής εικόνας. Δεύτερο σχήμα: ιστόγραμμα ran-sharpened εικόνας. Τρίτο σχήμα: ιστόγραμμα rescaled εικόνας.

3.2.4 Παραγωγή Δεδομένων Ελέγχου (Ground Truth)

Μετά από τις προαναφερόμενες προεπεξεργασίες των δορυφορικών εικόνων, στόχος ήταν ο προσδιορισμός της θέσης και του σχήματος των αμπελοτεμαχίων στις εικόνες και η απομόνωσή τους από την υπόλοιπη σκηνή. Αυτό επετεύχθη μέσω της ψηφιοποίησης των αμπελοτεμαχίων στις συγχωνευμένες (pan-sharpened) εικόνες των περιοχών μελέτης με χρήση φωτοερμηνείας. Η θέση των αμπελοτεμαχίων ψηφιοποιήθηκε στο λογισμικό Quantum GIS (version 2.18.28 Las Palmas). Σχεδιάστηκε ένα διανυσματικό αρχείο (shapefile layer) πολυγωνικού τύπου για κάθε εικόνα, που περιλάμβανε το σύνολο των αμπελοτεμαχίων της. Ως βοηθητικά εργαλεία για τη φωτοερμηνεία των αμπελώνων χρησιμοποιήθηκαν το Google Earth, καθώς και χάρτες της Google και του Bing μέσω των plugins GEarthView και OpenLayersPlugin.

Για το διαχωρισμό των αμπελιών από άλλες καλλιέργειες και την ψηφιοποίησή τους λήφθηκαν υπόψη κάποια χαρακτηριστικά της καλλιέργειας. Το αμπέλι φέρει το περισσότερο και πιο πράσινο φύλλωμα στα τέλη καλοκαιριού με αρχές φθινοπώρου και παραμένει μόνο το ξύλο το χειμώνα μέχρι τις αρχές της άνοιξης. Επίσης, η καλλιέργεια του αμπελιού ακολουθεί γραμμικό πρότυπο και οι γραμμές φύτευσης απέχουν μεταξύ τους μία απόσταση που κυμαίνεται από 0,5 έως 1,5 μέτρο.



Εικόνα 3.14. Ψηφιοποιημένα αμπέλια (κόκκινο χρώμα) στην περιοχή της Νάουσας 1, επί της pan-sharpened δορυφορικής εικόνας WV3.

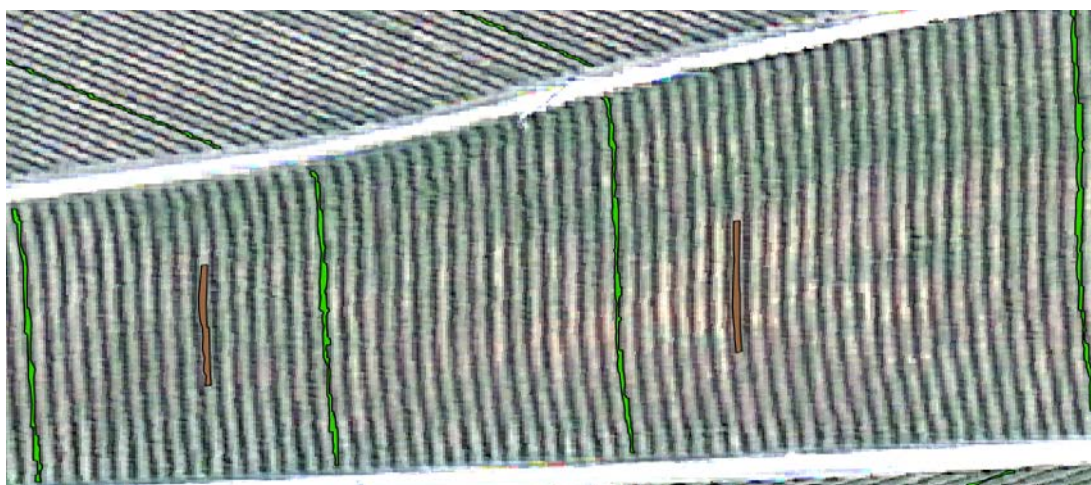
Στη συνέχεια, στα ήδη εντοπισμένα αμπελοτεμάχια πραγματοποιήθηκε δειγματοληπτική ψηφιοποίηση του φυλλώματος των αμπελιών για κάθε εικόνα. Η ψηφιοποίηση υλοποιήθηκε επί των pan-sharpened δορυφορικών εικόνων και για κάθε περιοχή δημιουργήθηκε ένα διανυσματικό αρχείο (shapefile layer) πολυγωνικού τύπου, που περιλαμβάνει το σύνολο των πολυγώνων που οριοθετούν τις γραμμές αμπελιών που ψηφιοποιήθηκαν.

Η δεύτερη ψηφιοποίηση τελέστηκε με αυστηρότερα όρια από την προηγούμενη, καθώς στόχος ήταν σε κάθε πολύγωνο να περικλείονται μόνο καθαρά *pixel* φυλλώματος και όχι εδάφους. Οι συνθήκες που πρέπει να ικανοποιούνται κατά την επιλογή των γραμμών αμπελιού για να συμπεριληφθούν στα δεδομένα ελέγχου είναι οι κάτωθι:

- α. Πρέπει να λαμβάνονται δείγματα που να καλύπτουν όλες τις φασματικές συμπεριφορές της καλλιέργειας. Η καλή βλάστηση και η ασθενής βλάστηση διαφέρουν αναφορικά με τη φασματική τους απόκριση. Επομένως, πρέπει να συμπεριλαμβάνονται όλες οι κατηγορίες ανάπτυξης των αμπελιών στα δεδομένα ελέγχου.
- β. Είναι απαραίτητη η παρατήρηση ολόκληρης της εικόνας πριν την ψηφιοποίηση, ώστε να προσδιοριστεί το μέγεθος των κατηγοριών φασματικής απόκρισης του αμπελιού και να ληφθεί αναλογικό πλήθος δειγμάτων από κάθε κατηγορία.
- γ. Οι γραμμές αμπελιών που ψηφιοποιούνται πρέπει να είναι συνεχείς, δηλαδή να μην παρεμβαίνουν *pixel* εδάφους εντός των ορίων των ψηφιοποιημένων πολυγώνων.

Οι τρεις παραπάνω συνθήκες ορίστηκαν με κριτήριο τη βέλτιστη αποτελεσματικότητα των δεδομένων ελέγχου στις παρακάτω ταξινομήσεις, στην υλοποίηση των οποίων συμμετέχουν.

Κατά τον ίδιο τρόπο ψηφιοποιήθηκαν δείγματα εδάφους τα οποία βρίσκονται ενδιάμεσα των γραμμών των αμπελιών και αποθηκεύτηκαν στο ίδιο διανυσματικό αρχείο με τα δείγματα των γραμμών των αμπελιών. Για το διαχωρισμό τους χρησιμοποιήθηκε ο κωδικός 1 για τις γραμμές αμπελιού και ο κωδικός 2 για το έδαφος. Και για τα δείγματα εδάφους ικανοποιήθηκαν οι παραπάνω συνθήκες, έτσι ώστε να είναι αντιπροσωπευτικά και να συμπεριλαμβάνονται όλοι οι τύποι εδάφους (γυμνό έδαφος, έδαφος με χαμηλή βλάστηση, οργωμένο έδαφος, αμμώδες έδαφος, αργιλώδες έδαφος).



Εικόνα 3.15. Ψηφιοποιημένα δείγματα γραμμών αμπελιού (πράσινο χρώμα) και εδάφους (καφέ χρώμα) στην περιοχή της Νάουσας 1, επί της *pan-sharpened* δορυφορικής εικόνας WV3.

Ακολουθώντας, τα διανυσματικά αρχεία (shapefile layers) πολυγωνικού τύπου που είχαν προκύψει από την ψηφιοποίηση των αμπελοτεμαχίων και των δειγμάτων φυλλώματος και εδάφους μετατράπηκαν σε raster. Σκοπός αυτής της μετατροπής ήταν ο συνδυασμός των ψηφιοποιημένων στοιχείων με τα δεδομένα των πολυφασματικών εικόνων, ώστε να λάβουν τις τιμές των αντίστοιχων εικονοστοιχείων στα οκτώ πολυφασματικά κανάλια.

3.2.5 Εξομάλυνση Εικόνων (Smoothing)

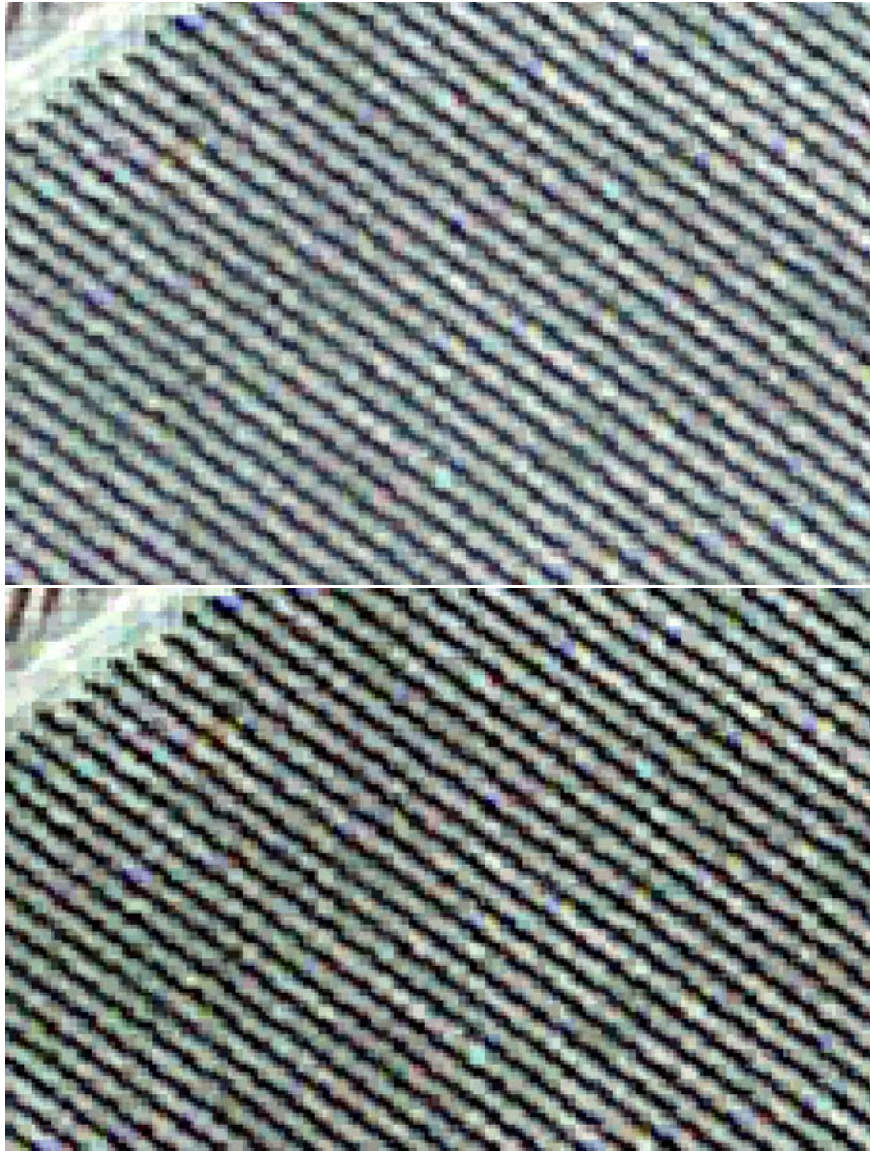
Η Εξομάλυνση Εικόνων (Smoothing) είναι μέρος της επεξεργασίας των εικόνων και αποτελεί μία τεχνική που στοχεύει στη μείωση του θορύβου της εικόνας χωρίς να αφαιρεί σημαντικά τμήματα του περιεχομένου της, όπως ακμές, γραμμές ή άλλες λεπτομέρειες που είναι σημαντικές για την ερμηνεία της εικόνας. Ακολουθήθηκε η μεθοδολογία αυτή ώστε να προκύψει μεγαλύτερη ομοιογένεια στα εικονοστοιχεία των δύο υπό μελέτη περιοχών σε κάθε εικόνα (φύλλωμα αμπελιού, έδαφος).

Για την εξομάλυνση των εικόνων στην προκείμενη εργασία χρησιμοποιήθηκε η Ανισότροπη Διάχυση (Anisotropic Diffusion), κατά την οποία δημιουργείται ένας χώρος στην ίδια κλίμακα με την εικόνα, όπου από την εικόνα παράγονται διαδοχικά όλο και πιο θολές εικόνες με βάση μία διαδικασία διάχυσης. Η Ανισότροπη Διάχυση προτάθηκε από τους Perona and Malik (1990), σύμφωνα με τους οποίους η διάχυση χαρακτηρίζεται ανομοιογενής και μη γραμμική. Πιο συγκεκριμένα, η ανισότροπη διάχυση παράγει μία οικογένεια παραμετροποιημένων εικόνων. Κάθε εικόνα που προκύπτει όμως αποτελεί συνδυασμό της αρχικής εικόνας και ενός φίλτρου, που εξαρτάται από το τοπικό περιεχόμενο της αρχικής εικόνας. Κατά συνέπεια, η διάχυση είναι πράγματι ένας μη γραμμικός μετασχηματισμός της αρχικής εικόνας.

Σύμφωνα με τους Kazmi et al. (2013), ο αλγόριθμος Perona-Malik λειτουργεί με ένα βασικό κριτήριο κατά το οποίο απομακρύνεται ο θόρυβος μόνο από τις ομοιογενείς περιοχές της εικόνας και δεν απομακρύνεται ο θόρυβος που υπάρχει μεταξύ αυτών των περιοχών, ώστε να διατηρούνται οι ακμές της εικόνας.

Στα πλαίσια της εργασίας, πραγματοποιήθηκε εξομάλυνση των rescaled εικόνων με τη μέθοδο της Ανισότροπης Διάχυσης. Η παράμετρος με βάση την οποία έγινε πειραματισμός ήταν ο αριθμός των επαναλήψεων. Για τις περισσότερες εικόνες χρειάστηκαν 50 επαναλήψεις για να επιτευχθεί ορθή εξομάλυνση. Εξάιρεση αποτέλεσαν οι περιοχές της Δράμας και της Νάουσας 2, για τις οποίες απαιτήθηκαν 10 επαναλήψεις.

Η εξομάλυνση που εφαρμόστηκε στις εικόνες επηρέασε εσωτερικά τις περιοχές ενδιαφέροντος (γραμμές αμπελιού και ενδιάμεσες γραμμές εδάφους), επιφέροντας μεγαλύτερη ομοιογένεια στα pixels κάθε περιοχής και επιπλέον δεν επηρεάστηκαν οι ακμές των εικόνων. Αυτό ήταν το επιθυμητό αποτέλεσμα, καθώς έγινε ευκολότερος ο εντοπισμός τους και ο διαχωρισμός μεταξύ τους κατά τη διάρκεια της ακόλουθης ταξινόμησης.



Εικόνα 3.16. Ενδεικτικό δείγμα εξομάλυνσης εικόνας στην περιοχή της Νάουσας 1.
Πάνω: Rescaled εικόνα. Κάτω: Εικόνα μετά την εξομάλυνση.

3.2.6 Δείκτες Βλάστησης

Για τον καλύτερο διαχωρισμό της βλάστησης των αμπελιών από το ενδιάμεσο έδαφος και τη διευκόλυνση της μετέπειτα ταξινόμησής τους στις αντίστοιχες κατηγορίες, υπολογίστηκαν ορισμένοι τηλεπισκοπικοί δείκτες βλάστησης στις δορυφορικές εικόνες. Πιο συγκεκριμένα, χρησιμοποιήθηκαν τα δεδομένα ελέγχου που προέκυψαν σε κάθε εικόνα για τη θέση των αμπελοτεμαχίων και στις περιοχές που οριοθετούνται από αυτά τα δεδομένα υπολογίστηκαν τέσσερις δείκτες βλάστησης στις rescaled εικόνες. Αναλυτικότερα, επιλέχθηκε ο δείκτης βλάστησης NDVI, δύο δείκτες βλάστησης με προσαρμογή εδάφους (MSAVI, OSAVI) και ένας δείκτης βλάστησης με τροποποιημένη επιρροή χλωροφύλλης (TCARI).

Δείκτης NDVI

Ο δείκτης NDVI (Normalized Difference Vegetation Index, Δείκτης Κανονικοποιημένης Διαφοράς Βλάστησης) είναι ο ευρύτερα διαδεδομένος δείκτης βλάστησης που χρησιμοποιείται σε δορυφορικά δεδομένα για την εκτίμηση της πράσινης βλάστησης σε μία περιοχή. Συγκεκριμένα, ποσοτικοποιεί τη βλάστηση συνυπολογίζοντας τη μέγιστη απορρόφηση στο κόκκινο λόγω της χλωροφύλλης των φυτών και τη μέγιστη ανακλαστικότητα στο υπέρυθρο, που προκαλείται από την κυτταρική δομή της επιφάνειας των φύλλων.

$$NDVI = (R_{800} - R_{670}) / (R_{800} + R_{670})$$

$$WV-3: NDVI = (R_{NIR1} - R_{RED}) / (R_{NIR1} + R_{RED}) = (Band7 - Band5) / (Band7 + Band5)$$

Ο δείκτης NDVI είναι κανονικοποιημένος, επομένως το εύρος τιμών του κυμαίνεται στο διάστημα [-1, 1]. Οι αρνητικές τιμές καταδεικνύουν συνήθως την ύπαρξη νερού, ενώ οι τιμές κοντά στο +1 προϋποθέτουν έντονη βλάστηση.

Δείκτης MSAVI

Ο δείκτης MSAVI (Modified Soil-Adjusted Vegetation Index) είναι ένας δείκτης βλάστησης που προσαρμόζει τον παράγοντα του εδάφους στους υπολογισμούς του. Παρουσιάζει ευαισθησία τόσο στις επιδράσεις του φυλλώματος, όσο και στις φασματικές ιδιότητες του εδάφους. Οι Qi et al. (1994) ανέπτυξαν αυτό το δείκτη ώστε να υπολογίζει ένα συντελεστή διόρθωσης της φωτεινότητας του εδάφους με απλό και αξιόπιστο τρόπο. Στην προκείμενη εργασία, που ο δείκτης εφαρμόζεται σε δορυφορικές εικόνες WorldView-3 και WorldView-2, ο προαναφερόμενος δείκτης ισούται με 0,5.

$$MSAVI = 0.5 * [(2 * R_{800} + 1) - \sqrt{(2 * R_{800} + 1)^2 - 8 * (R_{800} - R_{670})}]$$

$$WV-3: MSAVI = 0.5 * [(2 * R_{NIR1} + 1) - \sqrt{(2 * R_{NIR1} + 1)^2 - 8 * (R_{NIR1} - R_{RED})}] \\ = 0.5 * [(2 * Band7 + 1) - \sqrt{(2 * Band7 + 1)^2 - 8 * (Band7 - Band5)}]$$

Δείκτης OSAVI

Ο δείκτης OSAVI (Optimized Soil-Adjusted Vegetation Index, Βελτιστοποιημένος Δείκτης Βλάστησης με Προσαρμογή Εδάφους) είναι ιδιαίτερα χρήσιμος κατά τη μελέτη νεαρής βλάστησης, στην οποία παρεμβάλλονται μεγάλες επιφάνειες εδάφους. Ο δείκτης προτάθηκε από τους Rondeaux et al. (1996), σύμφωνα με τους οποίους χρησιμοποιείται ένας συντελεστής προσαρμογής του φόντου της βλάστησης, ο οποίος ισούται με 0,16, ώστε να υπολογίζεται και το ορατό έδαφος στη μέτρηση. Ο δείκτης OSAVI είναι ιδιαίτερα αποτελεσματικός για συνθήκες φυτοκάλυψης μεγαλύτερες του 50%.

$$OSAVI = (1 + 0.16) * ((R_{800} - R_{670}) / (R_{800} + R_{670} + 0.16))$$

$$WV-3: OSAVI = (1 + 0.16) * ((R_{NIR1} - R_{RED}) / (R_{NIR1} + R_{RED} + 0.16)) \\ = (1 + 0.16) * ((Band7 - Band5) / (Band7 + Band5 + 0.16))$$

Δείκτης TCARI

Ο δείκτης TCARI (Transformed Chlorophyll Absorption Ratio) είναι ένας δείκτης βλάστησης με τροποποιημένη επιρροή χλωροφύλλης. Προτάθηκε από τους Haboudane et al. (2002) και καταδεικνύει τη σχετική περιεκτικότητα της βλάστησης σε χλωροφύλλη. Επηρεάζεται από την ανάκλαση του υποκείμενου εδάφους, ιδιαίτερα σε βλάστηση με χαμηλό δείκτη φυλλικής επιφάνειας (LAI, Leaf Area Index).

$$TCARI = 3 * [(R_{700} - R_{670}) - 0.2 * (R_{700} - R_{550}) * (R_{700} / R_{670})]$$

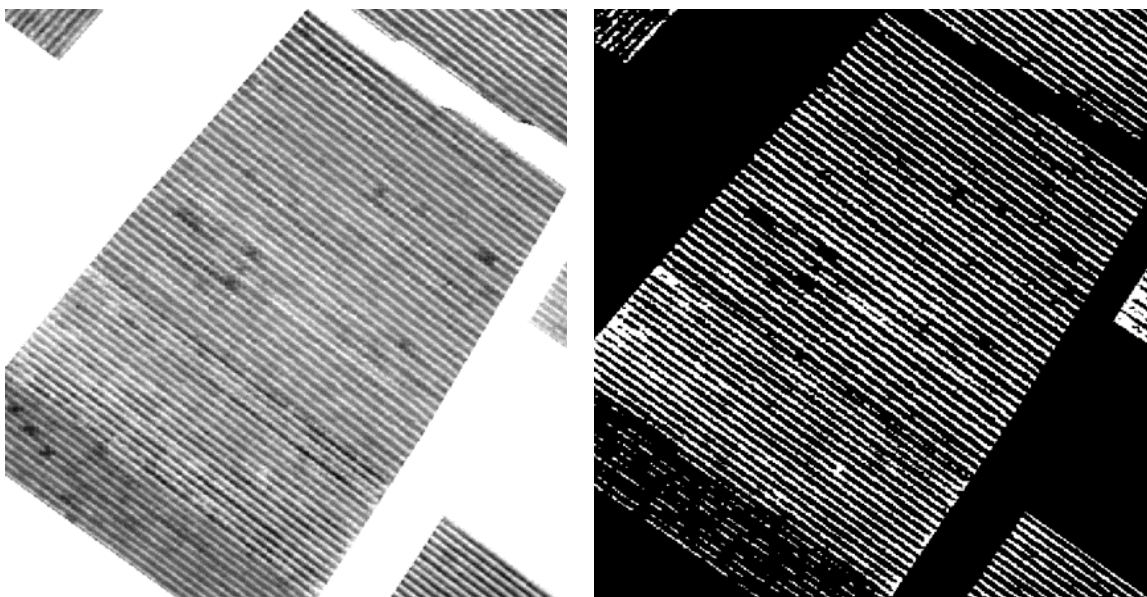
$$WV-3: TCARI = 3 * [(R_{Red-Edge} - R_{RED}) - 0.2 * (R_{Red-Edge} - R_{GREEN}) * (R_{Red-Edge} / R_{RED})] \\ = 3 * [(Band6 - Band5) - 0.2 * (Band6 - Band3) * (Band6 / Band5)]$$

Στον ακόλουθο πίνακα παρατίθενται αναλυτικά η συντομογραφία κάθε δείκτη, το πλήρες όνομα του δείκτη στη διεθνή βιβλιογραφία, το είδος του δείκτη, η συνάρτηση υπολογισμού του, καθώς και η προσαρμοσμένη συνάρτηση στις εικόνες WorldView-3 και WorldView-2 που χρησιμοποιήθηκε για τους υπολογισμούς της προκείμενης εργασίας.

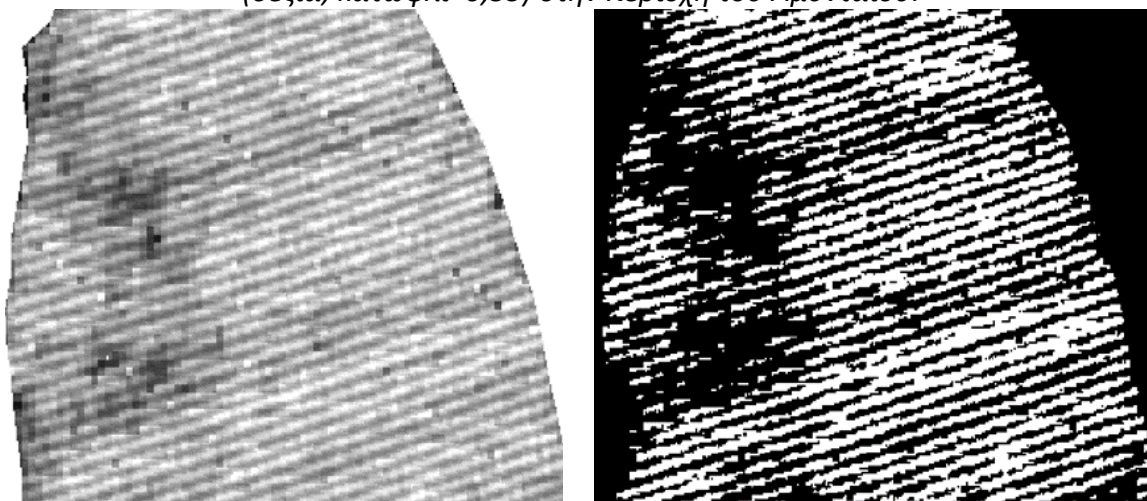
Δείκτης	Όνομα	Είδος Δείκτη	Συνάρτηση	Συνάρτηση για WV3, WV2
NDVI	Normalized Difference Vegetation Index	Δείκτης Βλάστησης	$(R_{800} - R_{670}) / (R_{800} + R_{670})$	$(R_{NIR1} - R_{RED}) / (R_{NIR1} + R_{RED})$
MSAVI	Modified Soil-Adjusted Vegetation Index	Δείκτης Βλάστησης με Προσαρμογή Εδάφους	$0.5 * [(2 * R_{800} + 1) - \sqrt{(2 * R_{800} + 1)^2 - 8 * (R_{800} - R_{670})}]$	$0.5 * [(2 * R_{NIR1} + 1) - \sqrt{(2 * R_{NIR1} + 1)^2 - 8 * (R_{NIR1} - R_{RED})}]$
OSAVI	Optimized Soil-Adjusted Vegetation Index	Δείκτης Βλάστησης με Προσαρμογή Εδάφους	$(1 + 0.16) * ((R_{800} - R_{670}) / (R_{800} + R_{670} + 0.16))$	$(1 + 0.16) * ((R_{NIR1} - R_{RED}) / (R_{NIR1} + R_{RED} + 0.16))$
TCARI	Transformed Chlorophyll Absorption Ratio	Δείκτης Βλάστησης με Τροποποιημένη Επιρροή Χλωροφύλλης	$3 * [(R_{700} - R_{670}) - 0.2 * (R_{700} - R_{550}) * (R_{700} / R_{670})]$	$3 * [(R_{Red-Edge} - R_{RED}) - 0.2 * (R_{Red-Edge} - R_{GREEN}) * (R_{Red-Edge} / R_{RED})]$

Πίνακας 3.3. Πίνακας συνοπτικής περιγραφής τηλεπισκοπικών δεικτών.

Παρακάτω παρουσιάζονται δύο ενδεικτικά αποτελέσματα του δείκτη NDVI για τις περιοχές του Αμυνταίου και της Καλής Βρύσης. Επιπλέον, έγιναν κάποιες κατωφλιώσεις του δείκτη NDVI σε κάθε περιοχή, ως μία πρώτη προσπάθεια εντοπισμού του φυλλώματος των αμπελιών, που όμως δεν απέδωσαν πλήρως και παρατίθεται μόνο κάποια ικανοποιητικά αποτελέσματα.



Εικόνα 3.17. Στιγμιότυπο του δείκτη βλάστησης NDVI (αριστερά) και της κατωφλίωσης (δεξιά, κατώφλι=0,35) στην περιοχή του Αμυνταίου.



Εικόνα 3.18. Στιγμιότυπο του δείκτη βλάστησης NDVI (αριστερά) και της κατωφλίωσης (δεξιά, κατώφλι=0,39) στην περιοχή της Καλής Βρύσης.

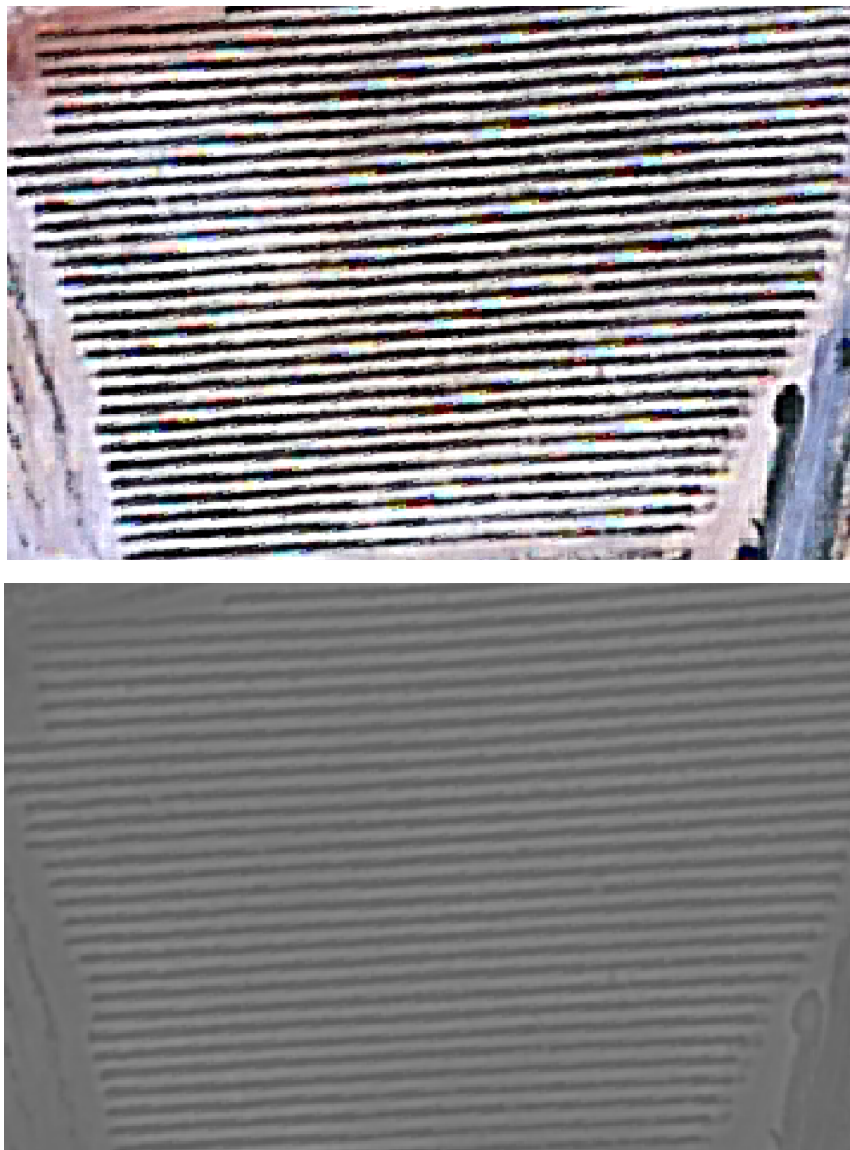
3.2.7 Χαρακτηριστικά Υφής

Ακόμα μία παράμετρος που υπολογίστηκε στα πλαίσια της παρούσας εργασίας για τον ευκρινέστερο διαχωρισμό των αμπελιών από το έδαφος είναι η Υφή.

Ως Υφή ορίζεται η συχνότητα μεταβολών του τόνου σε μία εικόνα, η οποία προκύπτει όταν ένας αριθμός πολύ μικρών αντικειμένων παρατηρούνται ως σύνολο. Διακρίνεται σε στιλπή (επιφάνεια ήρεμου νερού), απαλή (γυμνό έδαφος), λεπτή (εγκαταλελειμμένοι αγροί, αναγέννηση δάσους), τραχεία (πυκνό δάσος), κυματοειδής (επιφάνεια ελαφρώς ταραγμένης θάλασσας), γραμμική (καλλιέργειες σε γραμμική διάταξη) και κηλιδωτή (Περάκης, Φαρασλής και Μωυσιάδης, 2015). Οι διαβαθμίσεις του γκρι είναι συνέπεια του ότι τα διάφορα αντικείμενα αντανακλούν ή εκπέμπουν ακτινοβολία σε διάφορα μήκη κύματος (Παρχαρίδης, 2015).

Για τον υπολογισμό της υφής στις οκτώ δορυφορικές εικόνες χρησιμοποιήθηκε το ψηφιακό φίλτρο Gabor, το οποίο είναι ένα εργαλείο τοπικής ανάλυσης της συχνότητας. Το φίλτρο Gabor χαρακτηρίζεται από ισχυρή επιλεκτικότητα του προσανατολισμού (Hui et al., 2017) και αυτός ήταν ο λόγος που επιλέχθηκε, λόγω του προσανατολισμού και του γραμμικού προτύπου της καλλιέργειας του αμπελιού.

Ο προσδιορισμός της υφής πραγματοποιήθηκε μόνο εντός των ορίων των αμπελοτεμαχίων. Έγιναν πειράματα υπολογισμού της Υφής σε τρία πολυφασματικά κανάλια: το Κόκκινο, το Οριακό Κόκκινο και το Εγγύς Υπέρυθρο. Τα καλύτερα αποτελέσματα προέκυψαν από το κανάλι του Εγγύς Υπέρυθρου και αυτά χρησιμοποιήθηκαν στις ακόλουθες επεξεργασίες. Το αποτέλεσμα του υπολογισμού των χαρακτηριστικών υφής διευκόλυνε ακόμα περισσότερο το διαχωρισμό των αμπελιών από το έδαφος, καθώς επέφερε μεγαλύτερη ομοιογένεια στην τονικότητα των όμοιων αντικειμένων.



Εικόνα 3.19. Στιγμιότυπο από τον υπολογισμό της Υφής στην περιοχή της Μαντινείας. Πάνω: Rescaled εικόνα. Κάτω: Υφή της εικόνας.

3.3 Ταξινόμηση Δορυφορικών Εικόνων

3.3.1 Παραγωγή Φασματικού Υπερκύβου

Για τις ανάγκες της ταξινόμησης των δορυφορικών εικόνων με χρήση του ταξινομητή Random Forest δημιουργήθηκε για κάθε εικόνα ο φασματικός υπερκύβος, πραγματοποιήθηκε δηλαδή ένα «στακάρισμα» εικόνων (stack images). Πιο συγκεκριμένα, για κάθε περιοχή μελέτης σχηματίστηκε ένας κύβος (“cube”), ο οποίος αποτελείται από μία συστοιχία/στοιβάδα (stack) εικόνων. Οι εικόνες αυτές απαρτίζονται από τα 8 συγχωνευμένα πολυφασματικά κανάλια της δορυφορικής εικόνας, μετά την εξομάλυνση, και από πέντε επιπλέον χαρακτηριστικά (features):

1. Το Δείκτη Βλάστησης NDVI (Normalized Difference Vegetation Index, Δείκτης Κανονικοποιημένης Διαφοράς Βλάστησης).
2. Το Δείκτη βλάστησης με Προσαρμογή Εδάφους MSAVI (Modified Soil-Adjusted Vegetation Index).
3. Το Βελτιστοποιημένο Δείκτη Βλάστησης με Προσαρμογή Εδάφους OSAVI (Optimized Soil-Adjusted Vegetation Index).
4. Το Δείκτη Βλάστησης με Τροποποιημένη Επιρροή Χλωροφύλλης TCARI (Transformed Chlorophyll Absorption Ratio).
5. Το χαρακτηριστικό Υφής Gabor.

Τα επιπλέον χαρακτηριστικά που χρησιμοποιήθηκαν για τη δημιουργία του υπερκύβου των εικόνων επιλέχθηκαν με στόχο να βελτιώσουν τα αποτελέσματα των ταξινομήσεων κατά τον εντοπισμό των κατηγοριών που συμμετέχουν στη διαδικασία. Η συνεισφορά τους έγκειται στο γεγονός ότι παρέχουν περισσότερες πληροφορίες για κάθε εικονοστοιχείο, με αποτέλεσμα να εκπαιδεύεται επαρκέστερα ο αλγόριθμος.

Επομένως, κάθε φασματικός υπερκύβος αποτελείται από 13 «επίπεδα» με χωρική ανάλυση 0,3 m. Ο υπερκύβος είναι το τελικό σύνολο δεδομένων που χρησιμοποιείται για την υλοποίηση της ταξινόμησης σε κάθε δορυφορική εικόνα, αλλά και για την ταξινόμηση με συνδυασμό δορυφορικών εικόνων από διαφορετικές περιοχές μελέτης.

3.3.2 Κατηγορίες Ταξινόμησης και Σχεδιασμός Πειραμάτων

Η εργασία επικεντρώθηκε στα αμπελοτεμάχια κάθε δορυφορικής εικόνας και όλες οι επεξεργασίες έλαβαν χώρα εντός των ορίων τους, καθώς στόχος της ταξινόμησης ήταν να γίνει αυτόματος διαχωρισμός του φυλλώματος των αμπελιών από το ενδιάμεσο έδαφος με χρήση του αλγορίθμου Random Forest.

Επομένως, οι κατηγορίες της ταξινόμησης ήταν δύο: Αμπέλια (Vines), Όχι Αμπέλια (Not Vines). Στην κατηγορία Αμπέλια συγκαταλέγονται όλα τα εικονοστοιχεία που αναπαριστούν τα πρέμνα (φυτά αμπελιών) και στην κατηγορία Όχι Αμπέλια συγκαταλέγεται το έδαφος που παρεμβάλλεται μεταξύ των γραμμών των φυτών των αμπελιών, είτε είναι γυμνό είτε φέρει φυτοκάλυψη.

Τα στάδια που ακολουθούνται για την ταξινόμηση και αφορούν στο σχεδιασμό των πειραμάτων είναι τα εξής:

1. Εξαγωγή πίνακα χαρακτηριστικών και διανύσματος των labels

Για την εκπαίδευση του αλγορίθμου επιβλεπόμενης ταξινόμησης είναι απαραίτητα δύο σύνολα δεδομένων. Το πρώτο είναι το σύνολο X , δηλαδή το σύνολο των διανυσμάτων των τιμών των εικονοστοιχείων που ανήκουν στα δεδομένα εκπαίδευσης (feature table), για τα οποία είναι γνωστή η κατηγορία στην οποία ανήκουν. Για τα ζητούμενα εικονοστοιχεία είναι γνωστή η χωρική τους θέση από τα δεδομένα αναφοράς, αλλά οι φασματικές τιμές τους για τα κανάλια και τα υπόλοιπα χαρακτηριστικά βρίσκονται στον φασματικό υπερκύβο. Το δεύτερο σύνολο δεδομένων που απαιτείται για την εκπαίδευση του ταξινομητή είναι ένα διάνυσμα-στήλη που περιέχει τον κωδικό της κατηγορίας (ετικέτες-labels) που ανήκει κάθε γνωστό εικονοστοιχείο και ονομάζεται Y . Και αυτή η πληροφορία βρίσκεται στις τιμές των εικονοστοιχείων της εικόνας με τα δεδομένα αναφοράς.

Επομένως, η ζητούμενη πληροφορία βρίσκεται στα παραπάνω σύνολα δεδομένων και πρέπει να γίνει η αντιστοίχιση των θέσεων του διανύσματος Y με τις θέσεις του διανύσματος X . Το διάνυσμα X θα αντλήσει τις τιμές του από τον υπερκύβο, ενώ το διάνυσμα Y θα αντλήσει τις τιμές του από τη Ground Truth εικόνα.

2. Διαχωρισμός δεδομένων εκπαίδευσης και ελέγχου

Τα παραπάνω διανύσματα X , Y διαχωρίζονται σε επιμέρους τμήματα: X_{train} , Y_{train} και X_{test} , Y_{test} . Η εκπαίδευση του μοντέλου γίνεται με τα X_{train} , Y_{train} και η δοκιμή του ταξινομητή γίνεται με το X_{test} , χωρίς να του αποκαλυφθεί το Y_{test} . Κατά τη δοκιμή, πραγματοποιήθηκε η πρόβλεψη της κατηγορίας στην οποία ανήκει κάθε εικονοστοιχείο με βάση την εκπαίδευση που προηγήθηκε και προέκυψε σαν αποτέλεσμα το Y_{pred} . Στη συνέχεια, χρησιμοποιώντας το Y_{test} , που περιέχει τις αληθινές κατηγορίες των εικονοστοιχείων, και συγκρίνοντάς το με το Y_{pred} αξιολογήθηκε αν ο ταξινομητής εκπαιδεύτηκε επαρκώς.

Τα σύνολα train και test πρέπει να περιέχουν στοιχεία και από τις δύο κατηγορίες ταξινόμησης για να εκπαιδευτεί και να αξιολογηθεί σωστά το μοντέλο. Επομένως, ο διαχωρισμός των διανυσμάτων X , Y δε γίνεται τυχαία. Ο πιο διαδεδομένος τρόπος για να τελεστεί αυτός ο διαχωρισμός είναι η τεχνική του N-fold Cross_Validation. Κατά την προαναφερθείσα τεχνική, το σύνολο των διανυσμάτων των χαρακτηριστικών τιμών χωρίζεται σε N υποσύνολα. Έπειτα, κάθε ένα από αυτά χρησιμοποιείται σαν σύνολο ελέγχου, ενώ τα υπόλοιπα $N-1$ υποσύνολα ενώνονται και χρησιμοποιούνται σαν σύνολα εκπαίδευσης. Μετά το πέρας των N εκπαιδεύσεων, χρησιμοποιούνται τα αποτελέσματα για να βγει ένας μέσος όρος ακρίβειας για το μοντέλο.

Τα παραπάνω στάδια υλοποιήθηκαν για καθεμία από τις οκτώ δορυφορικές εικόνες, που αντιστοιχούν στις επτά περιοχές μελέτης. Χρησιμοποιήθηκε ο ταξινομητής Random Forest και για κάθε εικόνα έγιναν πειράματα χρησιμοποιώντας δεδομένα για εκπαίδευση και για αξιολόγηση του αλγορίθμου που προέρχονται από την ίδια εικόνα. Τα πειράματα σχετίζονται με το ποσοστό των δεδομένων που χρησιμοποιούνται για εκπαίδευση (ratio of training) και το ποσοστό των δεδομένων που χρησιμοποιούνται για αξιολόγηση (ratio of validation). Ο συνολικός χρόνος εκπαίδευσης σε κάθε πείραμα ανέρχεται στα 5-10 λεπτά, ενώ ο χρόνος που απαιτήθηκε για την πρόβλεψη του κάθε χάρτη κυμαίνεται στα 20-45 λεπτά, σε υπολογιστή με μνήμη RAM 48GB.

ΠΕΡΙΟΧΗ	Cross Validation Scheme	
	Training Ratio	Validation Ratio
Αμύνταιο	5 %	95%
	10 %	90 %
	20 %	80 %
	30 %	70 %
	40 %	60 %
	50 %	50 %
Κρήτη	10 %	90 %
	20 %	80 %
	30 %	70 %
	40 %	60 %
	50 %	50 %
Δράμα	5 %	95%
	10 %	90 %
	20 %	80 %
	30 %	70 %
	40 %	60 %
	50 %	50 %
Επανομή	10 %	90 %
	20 %	80 %
	30 %	70 %
	40 %	60 %
	50 %	50 %
Καλή Βρύση	5 %	95%
	10 %	90 %
	20 %	80 %
	30 %	70 %
	40 %	60 %
	50 %	50 %
Μαντινεία	5 %	95%
	10 %	90 %
	20 %	80 %

	30 %	70 %
	40 %	60 %
	50 %	50 %
Νάουσα 1	5 %	95%
	10 %	90 %
	20 %	80 %
	30 %	70 %
	40 %	60 %
	50 %	50 %
Νάουσα 2	5 %	95%
	10 %	90 %
	20 %	80 %
	30 %	70 %
	40 %	60 %
	50 %	50 %

Πίνακας 3.4. Χαρακτηριστικά πειραμάτων που υλοποιήθηκαν για κάθε περιοχή μελέτης.

Μετά την ολοκλήρωση των πειραμάτων για κάθε εικόνα ξεχωριστά, αποφασίστηκε να υλοποιηθούν πειράματα με συνδυασμό δορυφορικών εικόνων για την εκτέλεση του Random Forest. Πιο αναλυτικά, χρησιμοποιήθηκαν δεδομένα από δύο ή περισσότερες δορυφορικές εικόνες για την εκπαίδευση και την αξιολόγηση του αλγορίθμου και η πρόβλεψη των κατηγοριών έγινε σε ένα πλήθος δορυφορικών εικόνων, των οποίων τα δεδομένα μπορεί να συμμετέχουν ή να μη συμμετέχουν στα δεδομένα εκπαίδευσης. Παράλληλα, πραγματοποιήθηκαν πειράματα και με τα ratio of training και ratio of validation με συνδυασμό δορυφορικών εικόνων.

ΠΕΙΡΑΜΑ	TRAIN IMAGES	PREDICTION IMAGES
1	Κρήτη Επανομή Καλή Βρύση Νάουσα 1	Αμύνταιο Δράμα Μαντινεία Νάουσα 2
2	Αμύνταιο Δράμα Νάουσα 2 Καλή Βρύση Μαντινεία	Αμύνταιο Δράμα Νάουσα 2
3	Αμύνταιο Κρήτη Δράμα Επανομή Καλή Βρύση Μαντινεία Νάουσα 1	Νάουσα 2

4	Αμύνταιο Δράμα Επανομή Μαντινεία	Αμύνταιο Κρήτη Δράμα Επανομή Καλή Βρύση Μαντινεία Νάουσα 1 Νάουσα 2
5	Δράμα Μαντινεία	Αμύνταιο Επανομή

Πίνακας 3.5. Συνδυασμός δορυφορικών εικόνων σε πειράματα με *Random Forest*.

Ο τρόπος επιλογής των δορυφορικών εικόνων που συμμετέχουν σε κάθε πείραμα, καθώς και η αναλυτική περιγραφή του ποσοστού των δεδομένων που συμμετέχουν στην εκπαίδευση του αλγορίθμου εξηγούνται στο επόμενο κεφάλαιο.

3.3.3 Ποιοτική και Ποσοτική Αξιολόγηση

Για την αξιολόγηση των αποτελεσμάτων των πειραμάτων είναι απαραίτητη η αξιολόγηση της ακρίβειας της ταξινόμησης, τόσο ποιοτικά όσο και ποσοτικά. Σύμφωνα με τους Xie et al. (2008), έχουν παρατηρηθεί τέσσερα στάδια στις μεθόδους αξιολόγησης της ακρίβειας:

- Οπτική σύγκριση της εικόνας με τα αποτελέσματα της ταξινόμησης. Αποτελεί τον απλούστερο τρόπο αξιολόγησης, ωστόσο δε θεωρείται ακριβής μέθοδος καθώς δεν περιλαμβάνει κάποια ποσοτική αξιολόγηση.
- Σύγκριση των εκτάσεων των κατηγοριών που προέκυψαν από την ταξινόμηση με τις αντίστοιχες εκτάσεις στο έδαφος ή με τα δεδομένα ελέγχου (ground truth). Αποτελεί πιο αντικειμενική μέθοδο συγκριτικά με την προηγούμενη, αλλά ενέχει τον κίνδυνο μη ταυτοποίησης των θέσεων εντοπισμού των διάφορων καλύψεων γης.
- Σύγκριση των ετικετών (labels) των κλάσεων της ταξινομημένης εικόνας με τα δεδομένα ελέγχου (ground truth) για τις ίδιες θέσεις. Η μέθοδος χρησιμοποιεί διάφορα ποσοτικά μεγέθη, όπως είναι τα ποσοστά των σωστών και λανθασμένων ταξινομημένων στοιχείων.
- Πίνακας Σύγχυσης, ο οποίος αποτελεί την πιο ενδεδειγμένη μέθοδο αξιολόγησης. Χρησιμοποιώντας τα ποσοτικά μεγέθη της προηγούμενης μεθόδου, κατασκευάζεται ο πίνακας σύγχυσης που περιλαμβάνει μία πληθώρα μέτρων (π.χ. συνολική ακρίβεια, συντελεστής kappa κλπ.) και συσχετίζει την κάθε κλάση με τα δεδομένα αναφοράς.

Ο Πίνακας Σύγχυσης είναι ένας πίνακας συγκεκριμένης διάταξης, τετραγωνικής διάστασης, που επιτρέπει την απεικόνιση της απόδοσης ενός αλγορίθμου επιβλεπόμενης εκπαίδευσης και ο οποίος χρησιμοποιείται ευρέως σε εφαρμογές μηχανικής μάθησης. Κάθε σειρά του πίνακα αντιπροσωπεύει τις περιπτώσεις της προβλεπόμενης κλάσης, ενώ κάθε στήλη αντιπροσωπεύει τις περιπτώσεις της

πραγματικής κλάσης (ή αντίστροφα) και κάθε συνδυασμός διαστάσεων και κλάσης είναι μία μεταβλητή στον πίνακα ενδεχομένων (Visa et al., 2011). Επομένως, ο πίνακας αυτός είναι ένας εύκολος τρόπος να εντοπιστεί αν ο αλγόριθμος ταξινομεί εσφαλμένα τη μία κλάση ως τη δεύτερη.

Κάθε στοιχείο του πίνακα σύγχυσης αντιπροσωπεύει μία πιθανότητα και από το σύνολο των πιθανοτήτων προκύπτει η ακρίβεια της ταξινόμησης. Πιο αναλυτικά, ο ρόλος κάθε στοιχείου του πίνακα αναλύεται παρακάτω:

- Οι σειρές αντιστοιχούν στις κλάσεις των δεδομένων ελέγχου (ground truth).
- Οι στήλες αντιστοιχούν στις κλάσεις στο αποτέλεσμα ταξινόμησης.
- Η διαγώνιος του πίνακα αντιπροσωπεύει τον αριθμό των σωστά ταξινομημένων εικονοστοιχείων κάθε κατηγορίας.
- Τα εκτός διαγωνίου στοιχεία αντιπροσωπεύουν τα λανθασμένα ταξινομημένα εικονοστοιχεία, δηλαδή τον αριθμό των εικονοστοιχείων του ground truth που μετά την ταξινόμηση κατατάχθηκαν σε εσφαλμένη κατηγορία.

Για τον υπολογισμό της ακρίβειας της ταξινόμησης χρησιμοποιούνται τα παρακάτω μεγέθη:

- Ακρίβεια του Χρήστη (User's Accuracy): το ποσοστό των εικονοστοιχείων που τοποθετήθηκαν σωστά στην κλάση i ως προς τον συνολικό αριθμό εικονοστοιχείων που τοποθετήθηκαν σε αυτή.
- Ακρίβεια του Παραγωγού (Producer's Accuracy): το πλήθος των ορθά ταξινομημένων εικονοστοιχείων κάθε κατηγορίας, ως προς το σύνολο των εικονοστοιχείων αναφοράς που ανήκαν σε αυτή την κλάση.
- Ολική Ακρίβεια (Overall Accuracy): το συνολικό ποσοστό των ορθά ταξινομημένων εικονοστοιχείων, δηλαδή ο συνολικός αριθμός των σωστά ταξινομημένων εικονοστοιχείων (διαγώνιων στοιχείων) διαιρούμενος με τον συνολικό αριθμό των εικονοστοιχείων ελέγχου.
- Δείκτης kappa: αποτελεί μία πολυ-μεταβλητή ανάλυση, η οποία λαμβάνει υπόψη τις πιθανότητες τυχαίας κατηγοριοποίησης των ορθά ταξινομημένων εικονοστοιχείων στις κλάσεις τους και αφού τις συγκρίνει με την πραγματική ταξινόμηση εκφράζει το ποσοστό των σφαλμάτων που απέφυγε η πραγματική ταξινόμηση σε σχέση με την τυχαία.

Σύμφωνα με τον Stehman (1997), για την αξιολόγηση του αποτελέσματος της ταξινόμησης είναι απαραίτητο να λαμβάνονται υπόψη τόσο μέτρα ακρίβειας που μπορούν να ερμηνευθούν απευθείας ως πιθανότητες εμφάνισης ορισμένων τύπων σφαλμάτων ταξινόμησης όσο και μέτρα που δεν μπορούν να ερμηνευθούν ως τέτοια. Η Ακρίβεια του Χρήστη, η Ακρίβεια του Παραγωγού και η Ολική Ακρίβεια είναι μέτρα με πιθανολογική ερμηνεία. Ο Δείκτης kappa δεν παρουσιάζει τέτοια πιθανολογική ερμηνεία, λόγω της προσαρμογής μίας υποθετικής τυχαίας συνθήκης και λόγω της εξάρτησής του από τις οριακές αναλογίες του πίνακα σύγχυσης.

Ένα επιπρόσθετο μέτρο αξιολόγησης της ταξινόμησης είναι το F1-score, που συνυπολογίζει δύο επιμέρους μέτρα, την ακρίβεια (precision) και την ανάκληση (recall). Ο τύπος του F1-score είναι ο ακόλουθος:

$$F1\text{-score} = 2 * \frac{precision * recall}{precision + recall}$$

Ο συντελεστής του κλάσματος αποτελεί το βάρος της ακρίβειας σε σχέση με την ανάκληση. Οι ακρίβεια και η ανάκληση ορίζονται από τις παρακάτω σχέσεις:

$$Precision = \frac{TP}{TP + FP}$$

$$Recall = \frac{TP}{TP + FN}$$

Όπου:

- TP (True Positive): όσα στοιχεία ανήκουν στην κλάση 1 και ταξινομήθηκαν στην κλάση 1
- FN (False Negative): όσα στοιχεία ανήκουν στην κλάση 1 αλλά ταξινομήθηκαν στην κλάση 2
- FP (False Positive): όσα στοιχεία ανήκουν στην κλάση 2 αλλά ταξινομήθηκαν στην κλάση 1
- TN (True Negative): όσα στοιχεία ανήκουν στην κλάση 2 και ταξινομήθηκαν στην κλάση 2

Για την ευκρινέστερη απεικόνιση των παραπάνω εννοιών παρατίθεται ο παρακάτω πίνακας:

		Πρόβλεψη Ταξινόμησης	
		Positive	Negative
Δεδομένα Ελέγχου	Positive	True Positive	False Positive
	Negative	False Negative	True Negative

Πίνακας 3.6. Σκελετός του Πίνακα Σύγχυσης. Πηγή: www.towardsdatascience.com

4. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ

Στο τέταρτο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την υλοποίηση πειραμάτων με τον αλγόριθμο Random Forest, με χρήση της γλώσσας προγραμματισμού Python. Τα πειράματα χωρίζονται σε δύο κατηγορίες: τα πειράματα ανά δορυφορική εικόνα και τα πειράματα με συνδυασμό δορυφορικών εικόνων. Κάθε κατηγορία αναλύεται ξεχωριστά και παρατίθενται τα αποτελέσματα (ταξινομημένες εικόνες, πίνακες σύγχυσης), η συνολική αποτίμηση των αποτελεσμάτων και η ποιοτική και ποσοτική αξιολόγηση αυτών σύμφωνα με τους στόχους της ταξινόμησης. Κύριος στόχος για το σύνολο των πειραμάτων που έλαβαν χώρα ήταν ο εντοπισμός του φυλλώματος των αμπελιών και ο διαχωρισμός του από το έδαφος που παρεμβάλλεται ανάμεσα στα φυτά, καθώς και η αυτόματη εξαγωγή των γραμμών φύτευσης των αμπελιών.

4.1 Πειράματα Random Forest ανά εικόνα

Κατά το πρώτο στάδιο πειραματισμού υλοποιήθηκαν πειράματα ταξινόμησης με τον αλγόριθμο Random Forest για κάθε περιοχή μελέτης ξεχωριστά. Ο πειραματισμός έγκειται στο διαφορετικό ποσοστό δεδομένων ελέγχου που χρησιμοποιήθηκαν σε κάθε δοκιμή για την εκπαίδευση του αλγορίθμου, προκειμένου να εντοπιστεί το βέλτιστο ποσοστό εκπαίδευσης. Παρακάτω αναλύονται τα πειράματα και τα αποτελέσματα που προέκυψαν από αυτά για καθεμία από τις 8 δορυφορικές εικόνες.

4.1.1 Πειράματα ανά περιοχή μελέτης

Περιοχή Μελέτης: Αμύνταιο

Για τη δορυφορική εικόνα της περιοχής του Αμυνταίου πραγματοποιήθηκαν έξι πειράματα, με έξι διαφορετικά ποσοστά δεδομένων ελέγχου. Τα πειράματα υλοποιήθηκαν στο σύνολο των αμπελοτεμαχίων της περιοχής, όπως αυτά παρουσιάζονται στην παρακάτω εικόνα. Λόγω περιορισμένου χώρου, τα αποτελέσματα των πειραμάτων παρατίθενται για υποπεριοχές των αμπελοτεμαχίων, ώστε να είναι ευκρινέστερη η ταξινόμηση που προέκυψε στο εκάστοτε πείραμα.



Εικόνα 4.1. Αμπελοτεμάχια περιοχής Αμυνταίου.

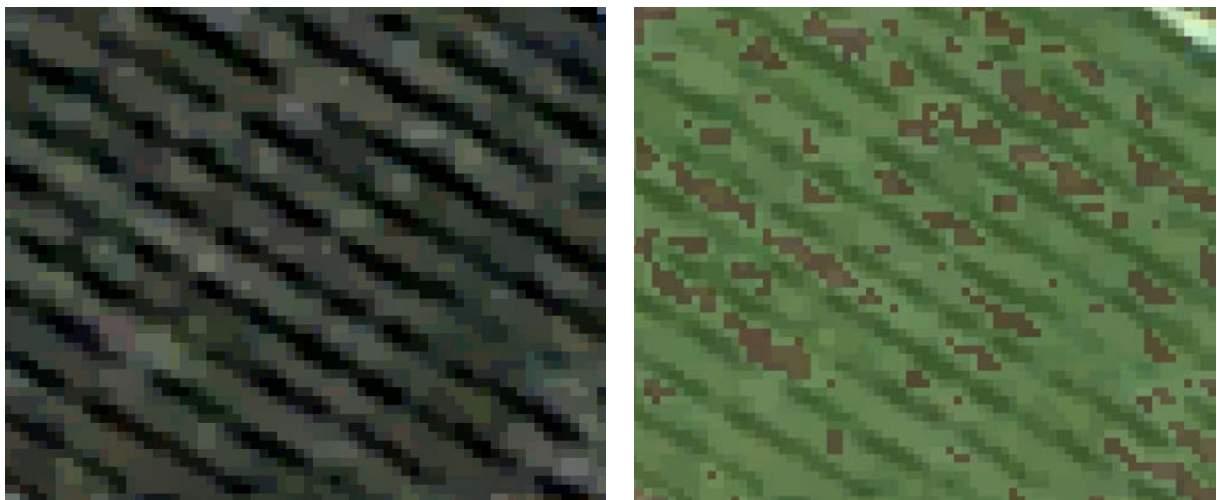
Πείραμα 1 (ratio = 10%)

Στο πρώτο πείραμα χρησιμοποιήθηκε το 10% των δεδομένων ελέγχου για την εκπαίδευση του αλγορίθμου (ratio = 10%) και το υπόλοιπο 90% χρησιμοποιήθηκε για την αξιολόγησή του. Παρακάτω παρουσιάζεται ένα τμήμα από την υπό ταξινόμηση πολυφασματική δορυφορική εικόνα και το αντίστοιχο τμήμα της ταξινομημένης εικόνας που προέκυψε.



Εικόνα 4.2. Επιτυχής ταξινόμηση. Αριστερά: Πολυφασματική δορυφορική εικόνα (RGB). Δεξιά: Ταξινομημένη εικόνα (πράσινο χρώμα: Αμπέλι, καφέ χρώμα: Έδαφος).

Η ταξινόμηση ήταν αποτελεσματική στο μεγαλύτερο μέρος της εικόνας, υπήρχαν όμως και κάποιες αστοχίες όπως στο παρακάτω παράδειγμα, όπου ο ταξινομητής έχει κατατάξει πολλά ρίxel εδάφους στην κατηγορία Αμπέλι. Οι αστοχίες αυτές παρουσιάζονται στα αμπέλια που δεν εμφανίζουν συνεχείς γραμμές και υπάρχει ενδιάμεση βλάστηση μεταξύ τους.



Εικόνα 4.3. Άστοχη ταξινόμηση. Αριστερά: Πολυφασματική δορυφορική εικόνα (RGB). Δεξιά: Ταξινομημένη εικόνα (πράσινο χρώμα: Αμπέλι, καφέ χρώμα: Έδαφος).

Στον πίνακα σύγχυσης που προέκυψε για την εκπαίδευση της εικόνας η ολική ακρίβεια ανέρχεται στο 99% ($OA = 0.99$) και το kappa στο 98% ($kappa = 0.98$), επομένως θεωρείται επιτυχής η ταξινόμηση. Επιπρόσθετα, παρατηρείται ότι η αστοχία ταξινόμησης στις δύο κατηγορίες κυμαίνεται στα ίδια επίπεδα, καθώς ο αριθμός ρίxel αμπελιού που ταξινομήθηκαν ως έδαφος είναι σχεδόν ίσος με τον αριθμό των ρίxel εδάφους που ταξινομήθηκαν ως αμπέλι.

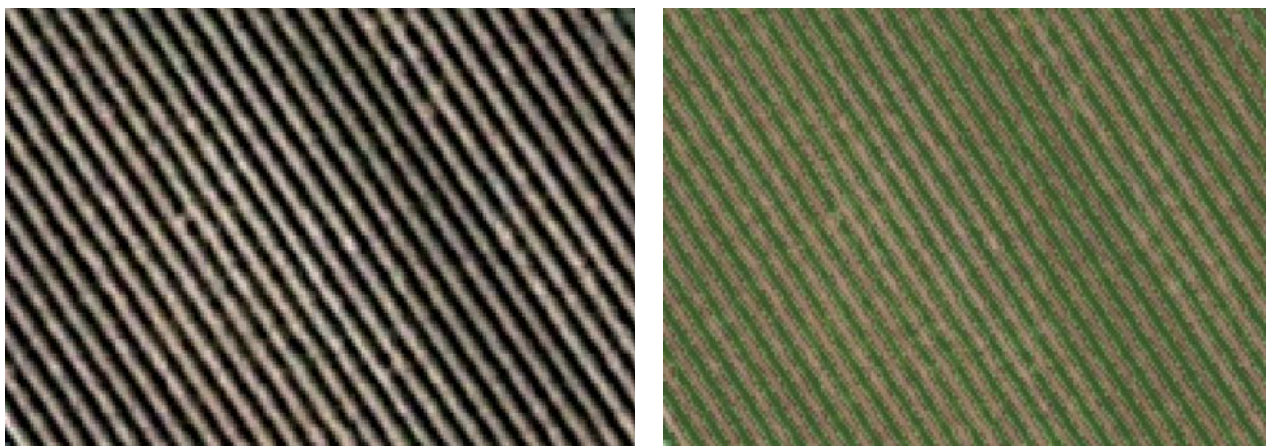
	ΑΜΠΕΛΙ	ΕΔΑΦΟΣ	ΑΘΡΟΙΣΜΑ	P.A.
ΑΜΠΕΛΙ	83341.0	271.0	83612.0	0.99
ΕΔΑΦΟΣ	274.0	18281.0	18555.0	0.99

ΑΘΡΟΙΣΜΑ	83615.0	18552.0	kappa:	0.98
U.A.	0.99	0.99	O.A.:	0.99

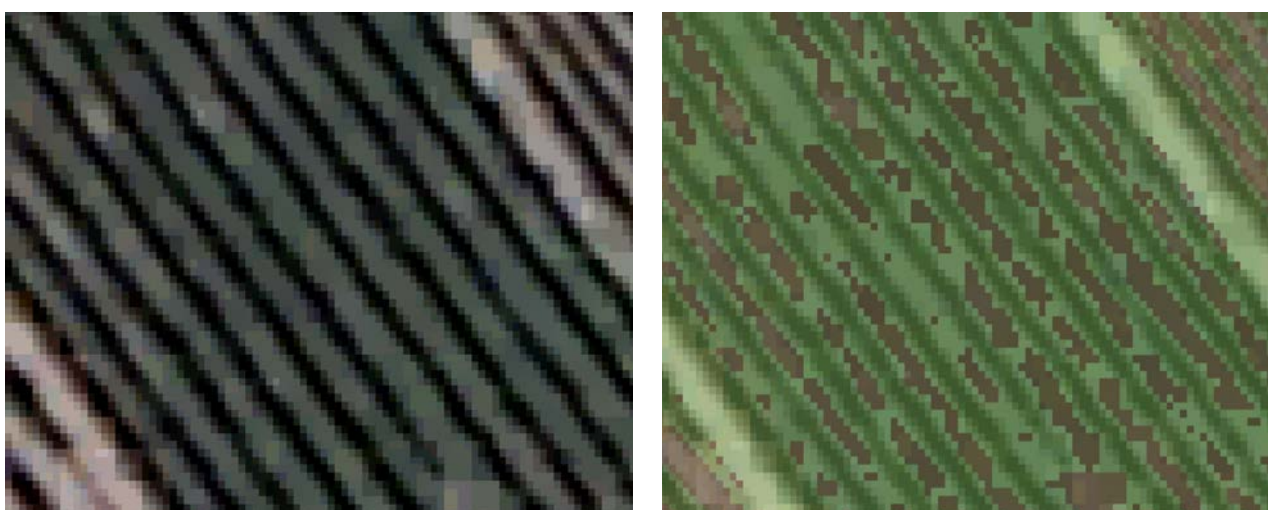
Πίνακας 4.1. Πίνακας Σύγκρισης για πείραμα με ratio = 10% στην περιοχή του Αμυνταίου.

Πείραμα 2 (ratio = 20%)

Στο δεύτερο πείραμα το 20% των δεδομένων ελέγχου χρησιμοποιήθηκε για την εκπαίδευση του αλγορίθμου και το 80% για την αξιολόγησή του. Σκοπός του πειράματος ήταν η βελτίωση της ταξινόμησης που έγινε στο πρώτο πείραμα, για τα στοιχεία της εικόνας που παρουσίασαν εσφαλμένη ταξινόμηση. Από την ποιοτική αξιολόγηση του αποτελέσματος παρατηρήθηκε ότι συνέχιζαν να υπάρχουν αστοχίες ταξινόμησης για αμπέλια που δεν εμφανίζουν ορθή ανάπτυξη. Παρακάτω παρατίθενται ένα παράδειγμα ορθής ταξινόμησης και ένα παράδειγμα άστοχης ταξινόμησης.



Εικόνα 4.4. Επιτυχής ταξινόμηση. Αριστερά: Πολυφασματική δορυφορική εικόνα (RGB). Δεξιά: Ταξινομημένη εικόνα (πράσινο χρώμα: Αμπέλι, καφέ χρώμα: Έδαφος).



Εικόνα 4.5. Άστοχη ταξινόμηση. Αριστερά: Πολυφασματική δορυφορική εικόνα (RGB). Δεξιά: Ταξινομημένη εικόνα (πράσινο χρώμα: Αμπέλι, καφέ χρώμα: Έδαφος).

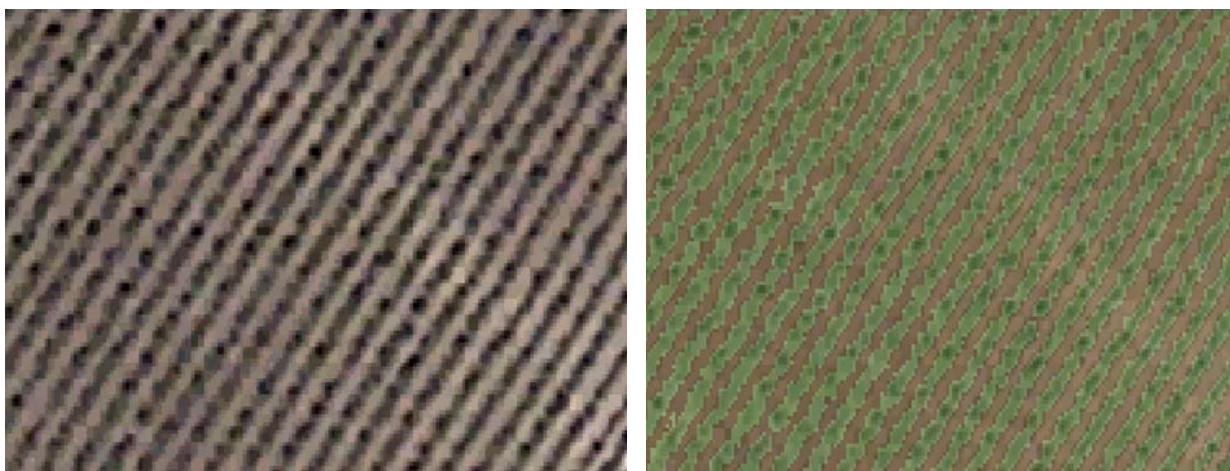
Από την ποσοτική αξιολόγηση της ταξινόμησης προκύπτει ότι το αποτέλεσμα είναι ικανοποιητικό (Ο.Α. = 0.99, kappa = 0.98). Συγκρίνοντας τις δύο κατηγορίες ταξινόμησης παρατηρείται ότι υπάρχει ελαφρώς μεγαλύτερη αστοχία στην ταξινόμηση των pixel του εδάφους σε σχέση με την ταξινόμηση των pixel των αμπελιών.

	ΑΜΠΕΛΙ	ΕΔΑΦΟΣ	ΑΘΡΟΙΣΜΑ	P.A.
ΑΜΠΕΛΙ	74066.0	177.0	74243.0	1.0
ΕΔΑΦΟΣ	258.0	16314.0	16572.0	0.98
ΑΘΡΟΙΣΜΑ	74324.0	16491.0	kappa:	0.98
Ο.Α.	0.99	0.99	Ο.Α.:	0.99

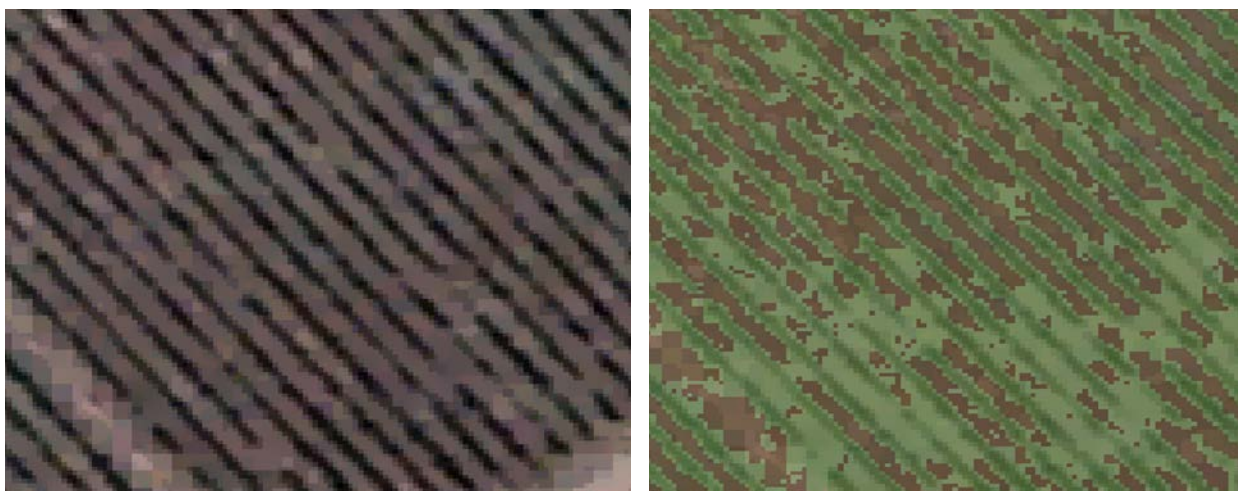
Πίνακας 4.2. Πίνακας Σύγχυσης για πείραμα με ratio = 20% στην περιοχή του Αμυνταίου.

Πείραμα 3 (ratio = 30%)

Το τρίτο πείραμα υλοποιήθηκε χρησιμοποιώντας το 30% των δεδομένων ελέγχου για την εκπαίδευση του αλγορίθμου και το 70% για την αξιολόγησή του. Από την ποιοτική και την ποσοτική του αξιολόγηση προκύπτει ότι είναι αποτελεσματική η ταξινόμηση και δεν υπάρχουν μεγάλες διαφορές με τα προηγούμενα δύο πειράματα.



Εικόνα 4.6. Επιτυχής ταξινόμηση. Αριστερά: Πολυφασματική δορυφορική εικόνα (RGB). Δεξιά: Ταξινομημένη εικόνα (πράσινο χρώμα: Αμπέλι, καφέ χρώμα: Έδαφος).



Εικόνα 4.7. Άστοχη ταξινόμηση. Αριστερά: Πολυφασματική δορυφορική εικόνα (RGB). Δεξιά: Ταξινομημένη εικόνα (πράσινο χρώμα: Αμπέλι, καφέ χρώμα: Έδαφος).

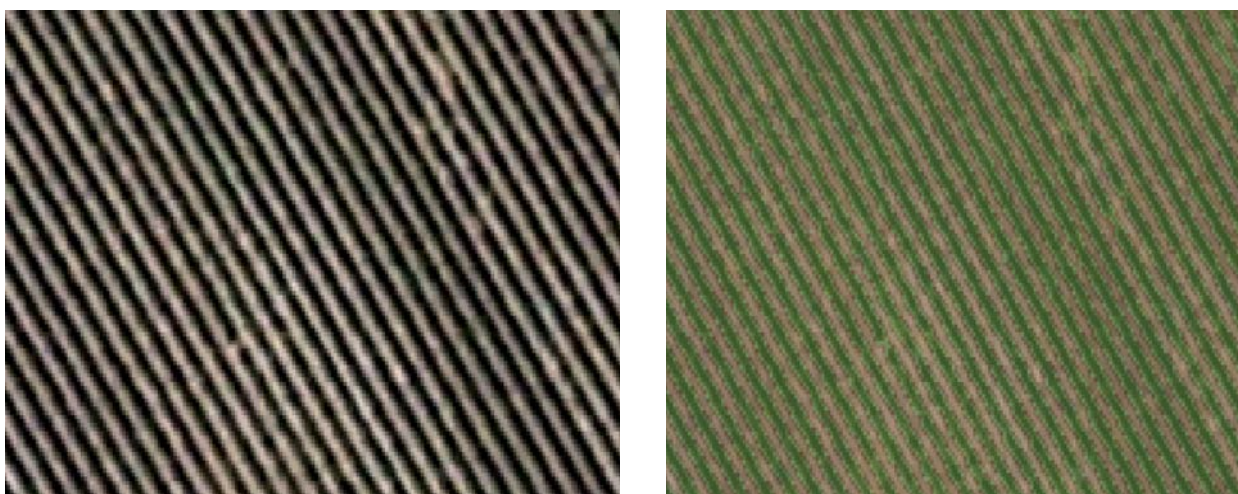
Οι αστοχίες της ταξινόμησης σχετίζονται και πάλι με την ταξινόμηση pixel εδάφους στην κατηγορία Αμπέλι, όπως προκύπτει και από τον Πίνακα Σύγχυσης.

	ΑΜΠΕΛΙ	ΕΔΑΦΟΣ	ΑΘΡΟΙΣΜΑ	P.A.
ΑΜΠΕΛΙ	64840.0	208.0	65048.0	0.99
ΕΔΑΦΟΣ	194.0	14222.0	14416.0	0.99
ΑΘΡΟΙΣΜΑ	65034.0	14430.0	kappa:	0.98
U.A.	0.99	0.99	O.A.:	0.99

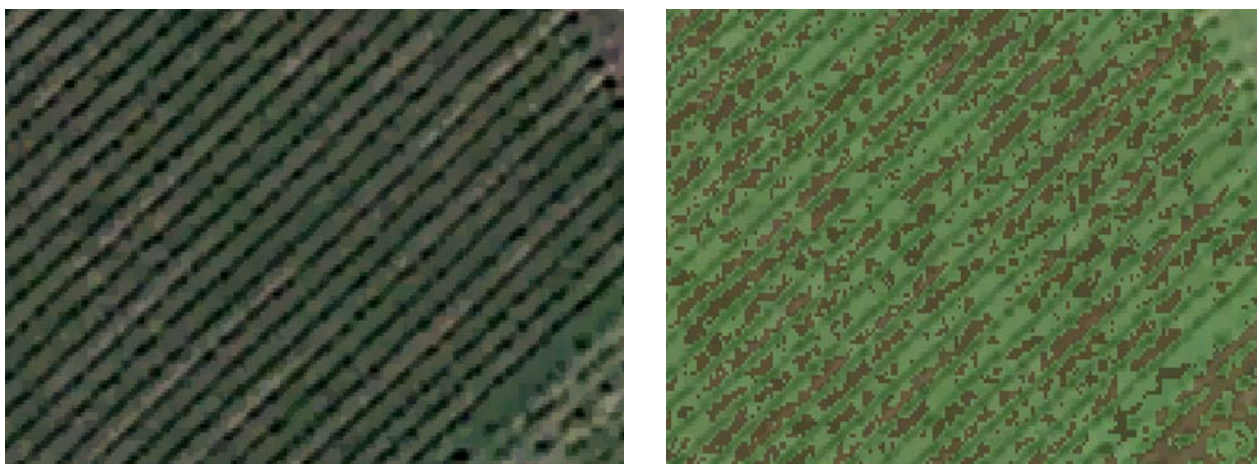
Πίνακας 4.3. Πίνακας Σύγχυσης για πείραμα με ratio = 30% στην περιοχή του Αμυνταίου.

Πείραμα 4 (ratio = 40%)

Στο τέταρτο πείραμα χρησιμοποιήθηκε το 40% των δεδομένων ελέγχου για την εκπαίδευση του αλγορίθμου και το 60% για την αξιολόγησή του. Το αποτέλεσμα είναι ικανοποιητικό όπως και στα προηγούμενα πειράματα, με όμοιες αστοχίες που οφείλονται στη φυσιολογική κατάσταση των αμπελιών.



Εικόνα 4.8. Επιτυχής ταξινόμηση. Αριστερά: Πολυφασματική δορυφορική εικόνα (RGB). Δεξιά: Ταξινομημένη εικόνα (πράσινο χρώμα: Αμπέλι, καφέ χρώμα: Έδαφος).



Εικόνα 4.9. Άστοχη ταξινόμηση. Αριστερά: Πολυφασματική δορυφορική εικόνα (RGB). Δεξιά: Ταξινομημένη εικόνα (πράσινο χρώμα: Αμπέλι, καφέ χρώμα: Έδαφος).

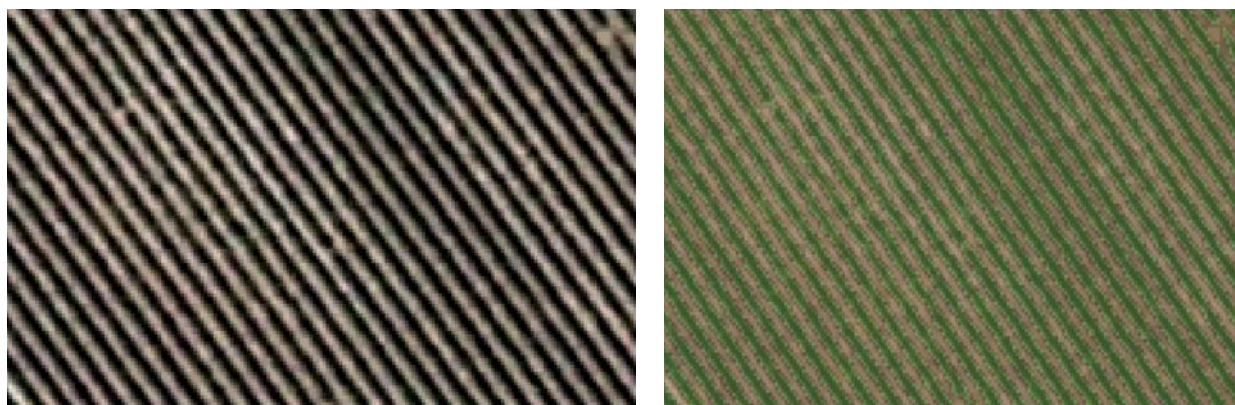
Και σε αυτό το πείραμα το πρόβλημα που προέκυψε σχετίζεται με την ταξινόμηση των pixel εδάφους στην κατηγορία Αμπέλι.

	ΑΜΠΕΛΙ	ΕΔΑΦΟΣ	ΑΘΡΟΙΣΜΑ	P.A.
ΑΜΠΕΛΙ	55569.0	103.0	55672.0	0.99
ΕΔΑΦΟΣ	174.0	12265.0	12439.0	0.99
ΑΘΡΟΙΣΜΑ	55743.0	12368.0	kappa:	0.99
U.A.	0.99	0.99	O.A.:	0.99

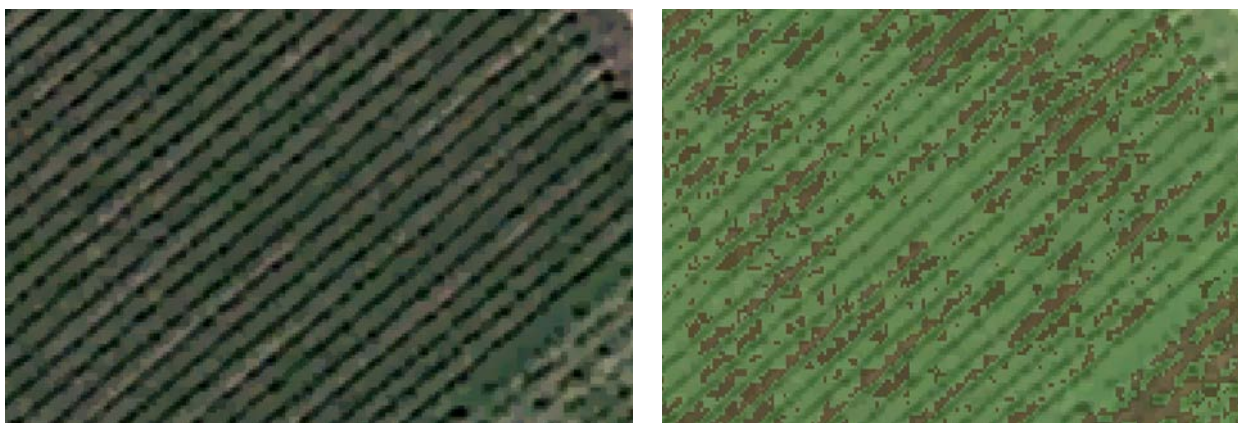
Πίνακας 4.4. Πίνακας Σύγχυσης για πείραμα με ratio = 40% στην περιοχή του Αμυνταίου.

Πείραμα 5 (ratio =50%)

Στο πέμπτο πείραμα χρησιμοποιήθηκε το 50% των δεδομένων ελέγχου για την εκπαίδευση του ταξινομητή και το 50% για την αξιολόγησή του. Και αυτή η ταξινόμηση θεωρείται επιτυχής, τόσο ποιοτικά όσο και ποσοτικά. Παρ' όλο που χρησιμοποιήθηκαν τα μισά δεδομένα ελέγχου για εκπαίδευση, η αποτελεσματικότητα της ταξινόμησης δε βελτιώθηκε για τα στοιχεία της εικόνας που δεν ταξινομούνταν σωστά στα προηγούμενα πειράματα.



Εικόνα 4.10. Επιτυχής ταξινόμηση. Αριστερά: Πολυφασματική δορυφορική εικόνα (RGB). Δεξιά: Ταξινομημένη εικόνα (πράσινο χρώμα: Αμπέλι, καφέ χρώμα: Έδαφος).



Εικόνα 4.11. Άστοχη ταξινόμηση. Αριστερά: Πολυφασματική δορυφορική εικόνα (RGB). Δεξιά: Ταξινομημένη εικόνα (πράσινο χρώμα: Αμπέλι, καφέ χρώμα: Έδαφος).

Τα προβλήματα με την ταξινόμηση των εικονοστοιχείων του εδάφους στην κατηγορία Αμπέλι είναι όμοια με παραπάνω, όμως η ταξινόμηση είναι επιτυχής σύμφωνα με τα ποσοτικά μέτρα αξιολόγησης.

	ΑΜΠΕΛΙ	ΕΔΑΦΟΣ	ΑΘΡΟΙΣΜΑ	P.A.
ΑΜΠΕΛΙ	46320.0	89.0	46409.0	0.99
ΕΔΑΦΟΣ	133.0	10218.0	10351.0	0.99
ΑΘΡΟΙΣΜΑ	46453.0	10307.0	kappa:	0.99
U.A.	0.99	0.99	O.A.:	0.99

Πίνακας 4.5. Πίνακας Σύγχυσης για πείραμα με ratio = 50% στην περιοχή του Αμυνταίου.

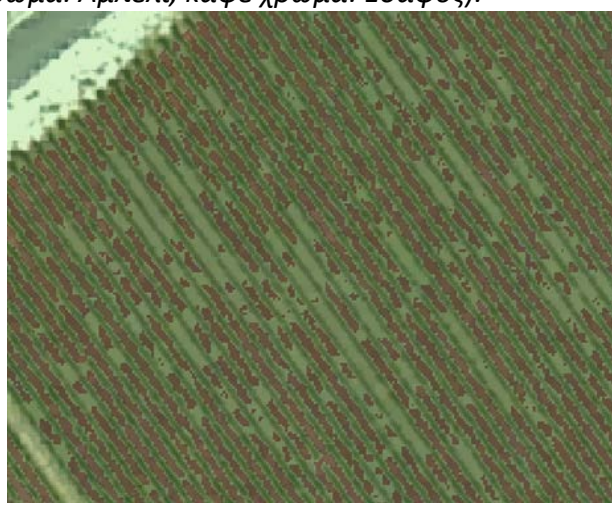
Πείραμα 6 (ratio = 5%)

Τα παραπάνω πειράματα επέφεραν επιτυχή ταξινόμηση σύμφωνα με την ποιοτική και ποσοτική αξιολόγησή τους, με κάποιες αστοχίες που δεν οφείλονται στον ταξινομητή αλλά στην ελλιπή ανάπτυξη των αμπελιών. Επομένως, αποφασίστηκε να υλοποιηθεί πείραμα με χρήση μικρότερου ποσοστού των δεδομένων ελέγχου για την εκπαίδευση του ταξινομητή και συγκεκριμένα με χρήση 5% των δεδομένων για την εκπαίδευση (ratio = 5%) και 95% για την αξιολόγηση. Με τη μείωση του ποσοστού των δεδομένων που χρησιμοποιούνται για την ταξινόμηση επιδιώκεται αύξηση της ακρίβειας του ταξινομητή.

Το πείραμα επέφερε εξίσου ικανοποιητική ταξινόμηση με τα προηγούμενα πειράματα, επομένως θεωρείται επιτυχής η δοκιμή εκπαίδευσης του αλγορίθμου με μικρότερο ποσοστό δεδομένων ελέγχου. Παρακάτω παρουσιάζονται τα παραγόμενα αποτελέσματά του.



Εικόνα 4.12. Επιτυχής ταξινόμηση. Αριστερά: Πολυφασματική δορυφορική εικόνα (RGB). Δεξιά: Ταξινομημένη εικόνα (πράσινο χρώμα: Αμπέλι, καφέ χρώμα: Έδαφος).



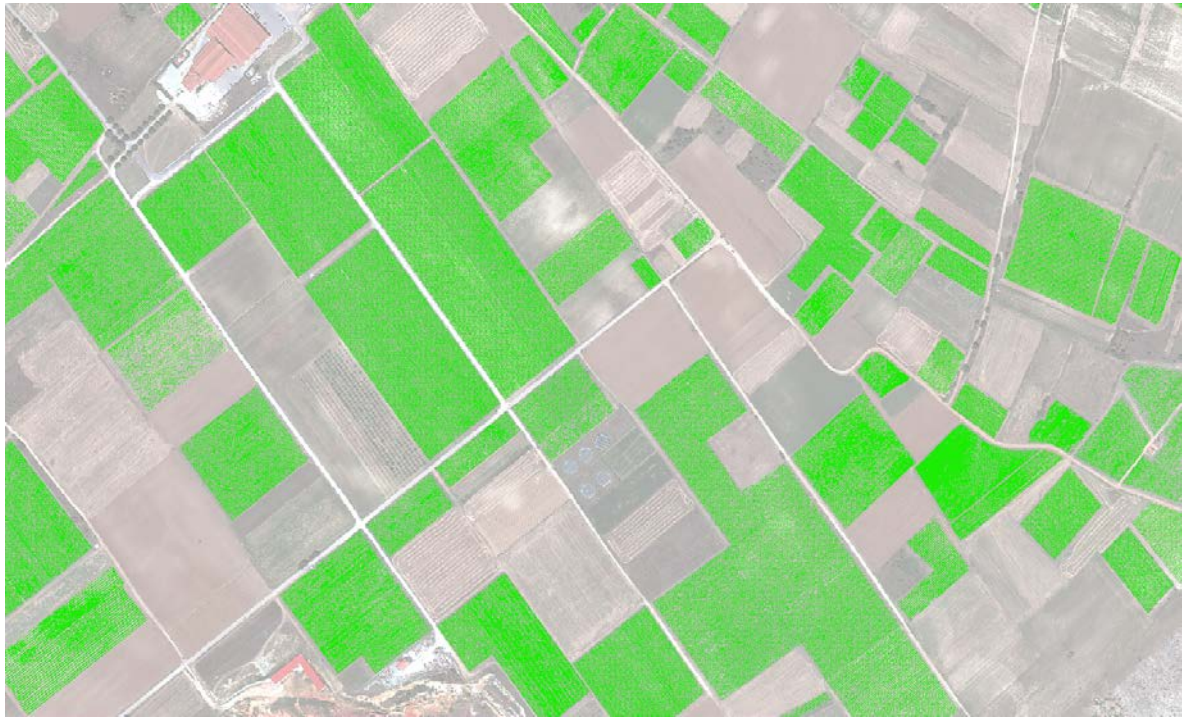
Εικόνα 4.13. Άστοχη ταξινόμηση. Αριστερά: Πολυφασματική δορυφορική εικόνα (RGB). Δεξιά: Ταξινομημένη εικόνα (πράσινο χρώμα: Αμπέλι, καφέ χρώμα: Έδαφος).

Όπως και στα προηγούμενα πειράματα που υλοποιήθηκαν για την περιοχή του Αμυνταίου, υπήρξαν αστοχίες στην ταξινόμηση των αμπελιών που δεν εμφανίζουν φυσιολογική ανάπτυξη και υπάρχει ενδιάμεση βλάστηση στο έδαφος μεταξύ των γραμμών. Τα ποσοτικά αποτελέσματα της ταξινόμησης στοιχειοθετούν ότι συντελείται επιτυχής ταξινόμηση και με μικρό ποσοστό εκπαίδευσης του αλγορίθμου.

	ΑΜΠΕΛΙ	ΕΔΑΦΟΣ	ΑΘΡΟΙΣΜΑ	P.A.
ΑΜΠΕΛΙ	87953.0	241.0	88194.0	0.99
ΕΔΑΦΟΣ	307.0	19342.0	19649.0	0.98
ΑΘΡΟΙΣΜΑ	88260.0	19583.0	kappa:	0.98
U.A.	0.99	0.99	O.A.:	0.99

Πίνακας 4.6. Πίνακας Σύγχυσης για πείραμα με ratio = 5% στην περιοχή του Αμυνταίου.

Η ταξινόμηση που προέκυψε για την περιοχή μελέτης του Αμυνταίου μέσω των παραπάνω πειραμάτων παρουσιάζεται για μία υποπεριοχή της εικόνας, ώστε να είναι εμφανής ο εντοπισμός του φυλλώματος στην εικόνα.



Εικόνα 4.14. Αποτέλεσμα ταξινόμησης στην περιοχή μελέτης του Αμυνταίου (πράσινο χρώμα: φύλλωμα).

Για πιο ολοκληρωμένη αξιολόγηση των αποτελεσμάτων των πειραμάτων, υπολογίστηκαν συγκριτικά ποσοτικά αποτελέσματα για την περιοχή του Αμυνταίου, ώστε να προκύψει ένα συνολικό συμπέρασμα για την ταξινόμηση της εικόνας.

	Ratio (training – validation)					
	5% - 95%	10% - 90%	20% - 80%	30% - 70%	40% - 60%	50% - 50%
O.A.	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99
kappa	0.98	0.98	0.98	0.98	0.99	0.99
U.A. (average)	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99
P.A. (average)	0.98	0.99	0.98	0.99	0.99	0.99
F1-score	0.98	0.99	0.98	0.99	0.98	0.98

Πίνακας 4.7. Πίνακας Συνολικών Ποσοτικών Αποτελεσμάτων για τα πειράματα στην περιοχή του Αμυνταίου.

Από τα ποσοτικά αποτελέσματα προκύπτει ότι η ακρίβεια της ταξινόμησης δεν επηρεάζεται από το ποσοστό δεδομένων ελέγχου που χρησιμοποιούνται για την εκπαίδευση του ταξινομητή, καθώς η Ολική Ακρίβεια σε όλα τα πειράματα διατηρείται σταθερή (Ο.Α. = 0,99). Το γεγονός αυτό οφείλεται στην επάρκεια των δεδομένων ελέγχου που συλλέχθηκαν για τις δύο κατηγορίες ταξινόμησης (Αμπέλι, Όχι Αμπέλι), που καλύπτουν το φασματικό εύρος των υπό ταξινόμηση εικονοστοιχείων. Επομένως, ο αλγόριθμος Random Forest, σε συνδυασμό με τα συγκεκριμένα δεδομένα αναφοράς, επιφέρει σταθερά αξιόπιστη ταξινόμηση στη δορυφορική εικόνα για την περιοχή μελέτης του Αμυνταίου.

Περιοχή Μελέτης: Κρήτη

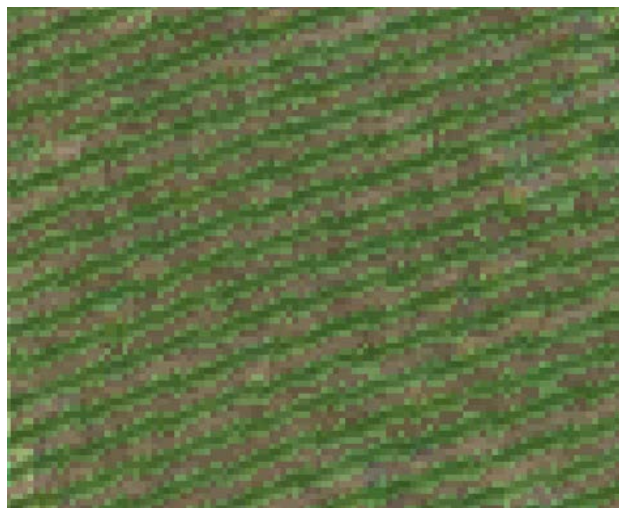
Για την περιοχή μελέτης της Κρήτης υλοποιήθηκαν πέντε πειράματα, με πέντε διαφορετικά ποσοστά δεδομένων ελέγχου που χρησιμοποιήθηκαν για την εκπαίδευση του αλγορίθμου. Τα πειράματα υλοποιήθηκαν στο σύνολο των αμπελοτεμαχίων της περιοχής, όπως αυτά παρουσιάζονται στην παρακάτω εικόνα. Λόγω περιορισμένου χώρου, τα αποτελέσματα των πειραμάτων παρατίθενται για υποπεριοχές των αμπελοτεμαχίων, ώστε να είναι ευκρινέστερη η ταξινόμηση που προέκυψε στο εκάστοτε πείραμα.



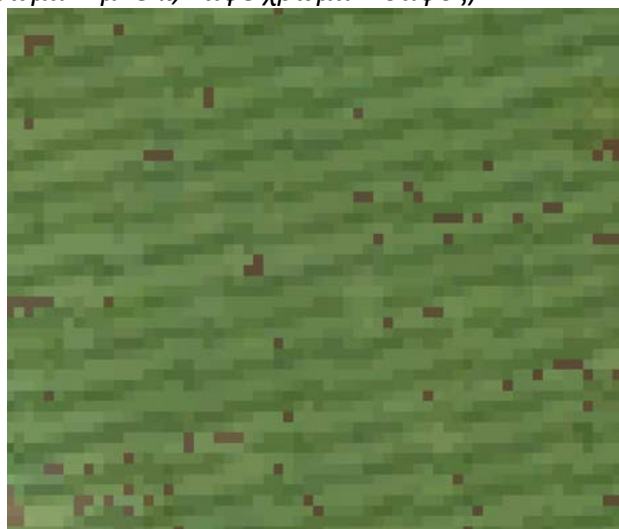
Εικόνα 4.15. Αμπελοτεμάχια περιοχής Κρήτης.

Πείραμα 1 (ratio = 10%)

Στο πρώτο πείραμα για τη δορυφορική εικόνα της Κρήτης χρησιμοποιήθηκε το 10% των δεδομένων ελέγχου για την εκπαίδευση του αλγορίθμου (ratio = 10%) και το 90% των δεδομένων ελέγχου για την αξιολόγησή του. Στόχος ήταν η ταξινόμηση των εικονοστοιχείων στις δύο κατηγορίες: Αμπέλι και Έδαφος. Παρακάτω παρουσιάζονται κάποια τμήματα της εικόνας με ορθή και άστοχη ταξινόμηση.



Εικόνα 4.16. Επιτυχής ταξινόμηση. Αριστερά: Πολυφασματική δορυφορική εικόνα (RGB). Δεξιά: Ταξινομημένη εικόνα (πράσινο χρώμα: Αμπέλι, καφέ χρώμα: Έδαφος).



Εικόνα 4.17. Άστοχη ταξινόμηση. Αριστερά: Πολυφασματική δορυφορική εικόνα (RGB). Δεξιά: Ταξινομημένη εικόνα (πράσινο χρώμα: Αμπέλι, καφέ χρώμα: Έδαφος).

Σύμφωνα με την ποιοτική αξιολόγηση, η ταξινόμηση θεωρείται επιτυχημένη για το μεγαλύτερο μέρος της εικόνας. Όπως όμως φαίνεται και στην εικόνα 4.14, υπήρχαν κάποιες αστοχίες ταξινόμησης σε αμπελοτεμάχια με ασυνεχείς γραμμές αμπελιών και ενδιάμεση βλάστηση, με αποτέλεσμα αρκετά pixel εδάφους να κατηγοριοποιούνται ως Αμπέλι. Η αστοχία αυτή διαφαίνεται και στα ποσοτικά μέτρα αξιολόγησης, όπου η Ακρίβεια του Χρήστη (U.A. = 0.8) είναι μικρότερη από την Ακρίβεια του Παραγωγού (P.A. = 0.87) για την κατηγορία Έδαφος.

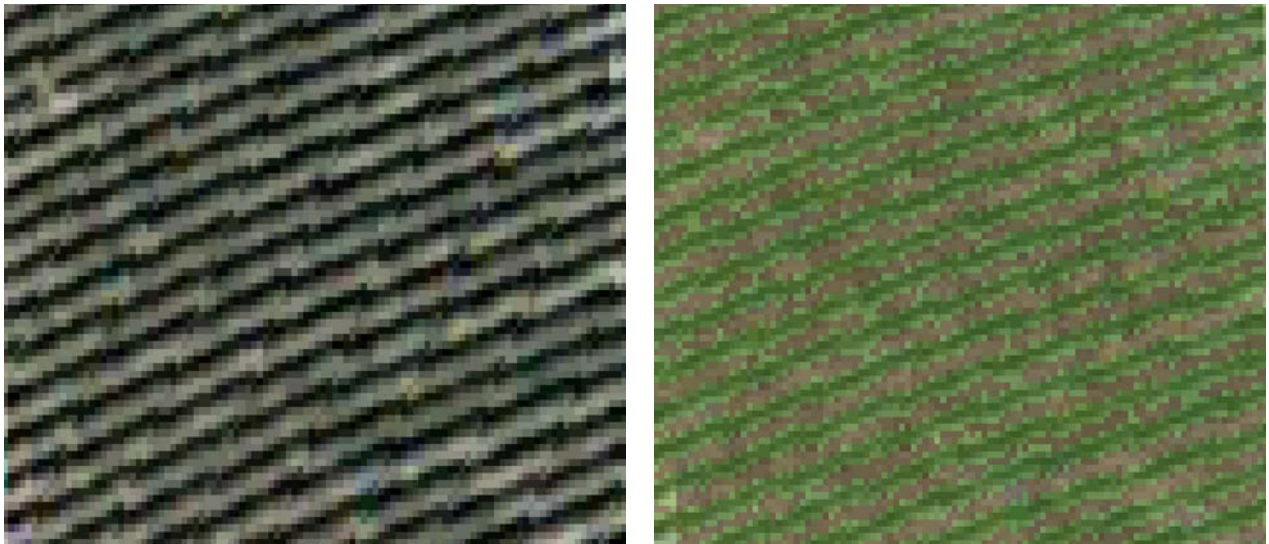
	ΑΜΠΕΛΙ	ΕΔΑΦΟΣ	ΑΘΡΟΙΣΜΑ	P.A.
ΑΜΠΕΛΙ	28004.0	534.0	28538.0	0.98
ΕΔΑΦΟΣ	341.0	2188.0	2529.0	0.87
ΑΘΡΟΙΣΜΑ	28345.0	2722.0	κappa:	0.82
U.A.	0.99	0.8	O.A.:	0.97

Πίνακας 4.8. Πίνακας Σύγκρισης για πείραμα με ratio = 10% στην περιοχή της Κρήτης.

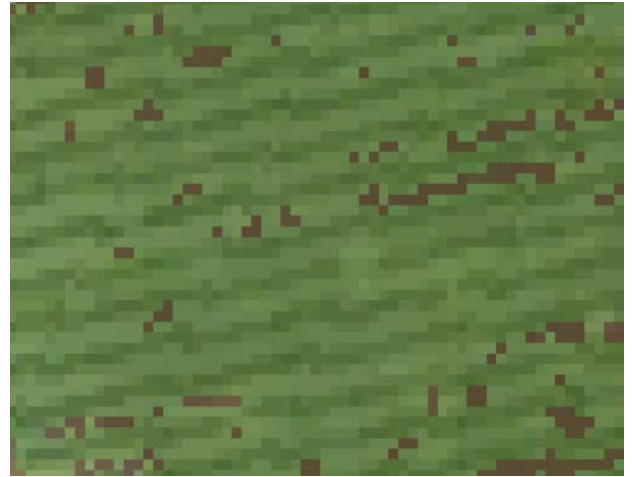
Επιπρόσθετα, επειδή τα δεδομένα ελέγχου για το Έδαφος ήταν αριθμητικά λιγότερα από αυτά για το Αμπέλι, υπήρχε το ενδεχόμενο να υπήρξε μεροληψία της ταξινόμησης υπέρ της κατηγορίας Αμπέλι. Για το λόγο αυτό αποφασίστηκε να γίνουν πειράματα και με μεγαλύτερα ποσοστά εκπαίδευσης του αλγορίθμου.

Πείραμα 2 (ratio = 20%)

Στο δεύτερο πείραμα πραγματοποιήθηκε εκπαίδευση του αλγορίθμου με ποσοστό 20% των δεδομένων ελέγχου (ratio = 20%) και αξιολόγησή του με το 80% των δεδομένων. Παρακάτω παρουσιάζονται κάποια σημεία της εικόνας, με επιτυχή και ανεπιτυχή ταξινόμηση.



Εικόνα 4.18. Επιτυχής ταξινόμηση. Αριστερά: Πολυφασματική δορυφορική εικόνα (RGB). Δεξιά: Ταξινομημένη εικόνα (πράσινο χρώμα: Αμπέλι, καφέ χρώμα: Έδαφος).



Εικόνα 4.19. Άστοχη ταξινόμηση. Αριστερά: Πολυφασματική δορυφορική εικόνα (RGB). Δεξιά: Ταξινομημένη εικόνα (πράσινο χρώμα: Αμπέλι, καφέ χρώμα: Έδαφος).

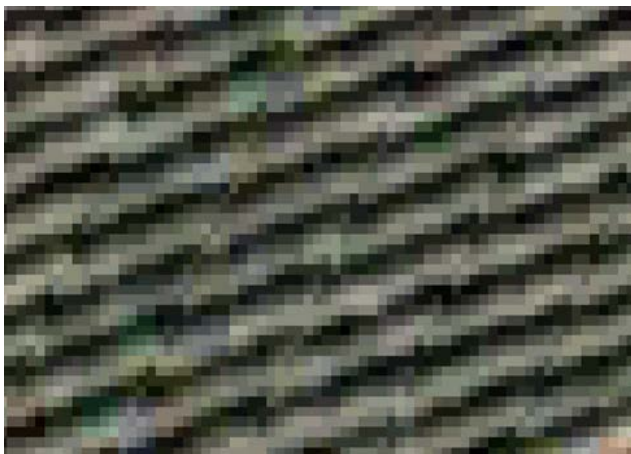
Όπως φαίνεται στην εικόνα 4.16, και σε αυτό το πείραμα υπάρχει αστοχία στην ταξινόμηση του εδάφους, παρ' όλο που χρησιμοποιήθηκαν περισσότερα δεδομένα ελέγχου για την εκπαίδευση. Σύμφωνα με τον πίνακα σύγκυσης, η ταξινόμηση κρίνεται ελάχιστα βελτιωμένη για την κατηγορία Έδαφος (U.A. = 0.81 , P.A. = 0.88).

	ΑΜΠΕΛΙ	ΕΔΑΦΟΣ	ΑΘΡΟΙΣΜΑ	P.A.
ΑΜΠΕΛΙ	24940.0	453.0	25393.0	0.98
ΕΔΑΦΟΣ	256.0	1967.0	2223.0	0.88
ΑΘΡΟΙΣΜΑ	25196.0	2420.0	kappa:	0.83
U.A.	0.99	0.81	O.A.:	0.97

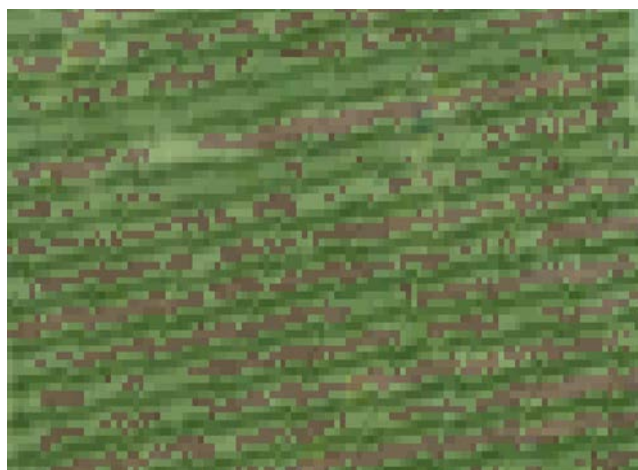
Πίνακας 4.9. Πίνακας Σύγκυσης για πείραμα με ratio = 20% στην περιοχή της Κρήτης.

Πείραμα 3 (ratio = 30%)

Στο τρίτο πείραμα ο αλγόριθμος εκπαιδεύεται με το 30% των δεδομένων ελέγχου και το υπόλοιπο 70% χρησιμοποιείται για την αξιολόγησή του. Παρακάτω παρουσιάζονται κάποια τμήματα της ταξινόμησης.



Εικόνα 4.20. Επιτυχής ταξινόμηση. Αριστερά: Πολυφασματική δορυφορική εικόνα (RGB). Δεξιά: Ταξινομημένη εικόνα (πράσινο χρώμα: Αμπέλι, καφέ χρώμα: Έδαφος).



Εικόνα 4.21. Άστοχη ταξινόμηση. Αριστερά: Πολυφασματική δορυφορική εικόνα (RGB). Δεξιά: Ταξινομημένη εικόνα (πράσινο χρώμα: Αμπέλι, καφέ χρώμα: Έδαφος).

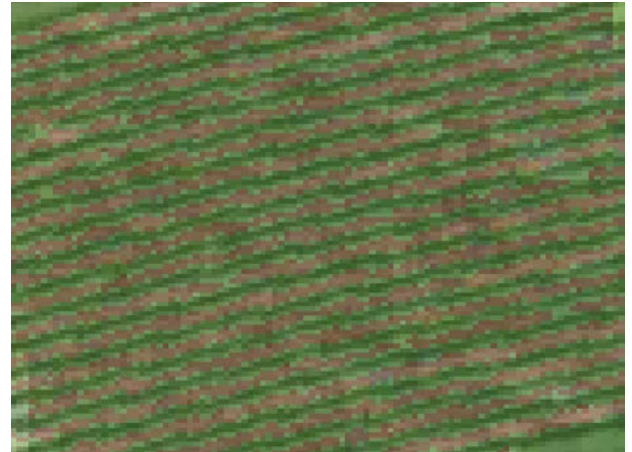
Από τον πίνακα σύγχυσης προκύπτει ότι η ταξινόμηση με ratio = 30% είναι πιο ικανοποιητική από τις προηγούμενες, καθώς τόσο η Ακρίβεια του Χρήστη (U.A. = 0.85) όσο και η Ακρίβεια του Παραγωγού (P.A. = 0.89) για την κατηγορία Έδαφος αυξήθηκαν. Επιπλέον, το kappa και η Ολική Ακρίβεια της ταξινόμησης αυξήθηκαν (kappa = 0.86, O.A. = 0.98) σε σχέση με το Πείραμα 1 (kappa = 0.82, O.A. = 0.97) και με το Πείραμα 2 (kappa = 0.83, O.A. = 0.97).

	ΑΜΠΕΛΙ	ΕΔΑΦΟΣ	ΑΘΡΟΙΣΜΑ	P.A.
ΑΜΠΕΛΙ	21823.0	318.0	22141.0	0.99
ΕΔΑΦΟΣ	223.0	1799.0	2022.0	0.89
ΑΘΡΟΙΣΜΑ	22046.0	2117.0	kappa:	0.86
U.A.	0.99	0.85	O.A.:	0.98

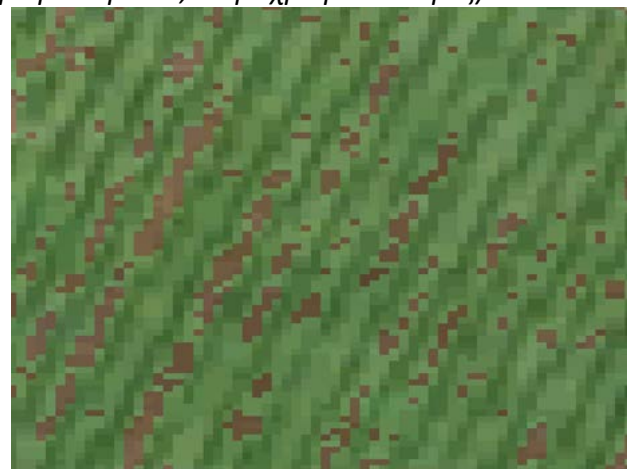
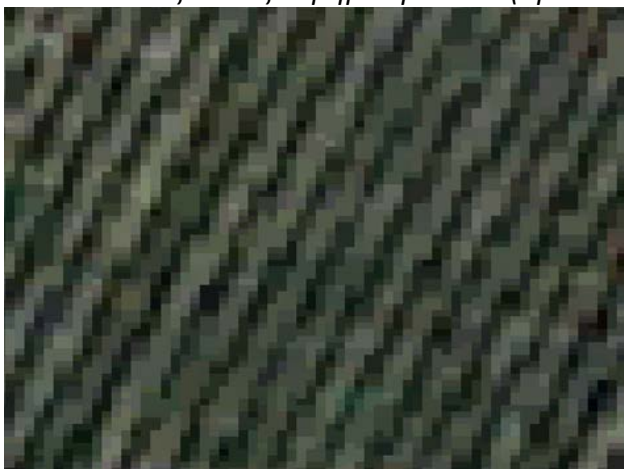
Πίνακας 4.10. Πίνακας Σύγχυσης για πείραμα με ratio = 30% στην περιοχή της Κρήτης.

Πείραμα 4 (ratio = 40%)

Το τέταρτο πείραμα πραγματοποιήθηκε εκπαιδεύοντας τον ταξινομητή με το 40% των δεδομένων ελέγχου και αξιολογώντας τον με το 60% αυτών. Τα αποτελέσματα αυτής της ταξινόμησης παρατίθενται παρακάτω.



Εικόνα 4.22. Επιτυχής ταξινόμηση. Αριστερά: Πολυφασματική δορυφορική εικόνα (RGB). Δεξιά: Ταξινομημένη εικόνα (πράσινο χρώμα: Αμπέλι, καφέ χρώμα: Έδαφος).



Εικόνα 4.23. Άστοχη ταξινόμηση. Αριστερά: Πολυφασματική δορυφορική εικόνα (RGB). Δεξιά: Ταξινομημένη εικόνα (πράσινο χρώμα: Αμπέλι, καφέ χρώμα: Έδαφος).

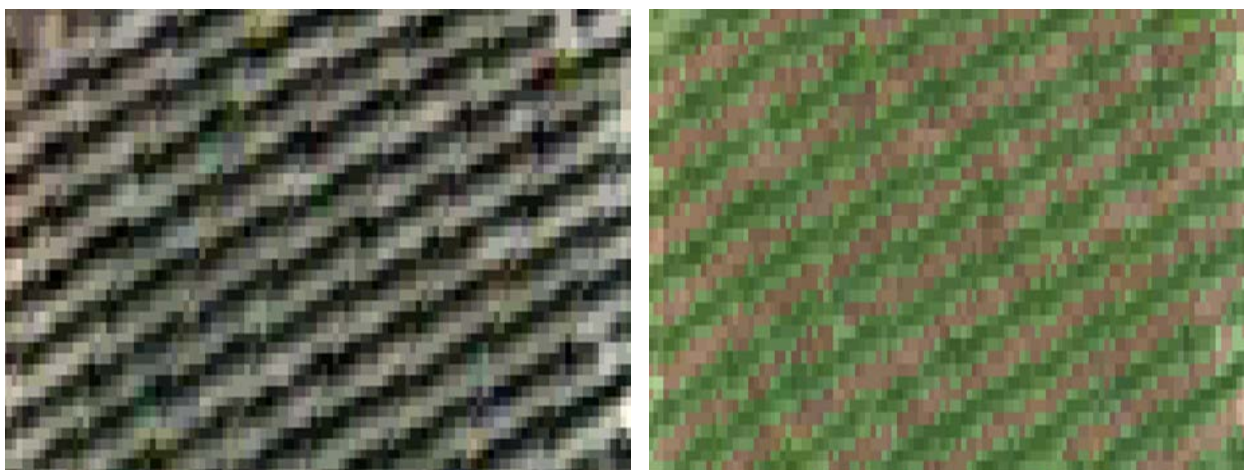
Στο μεγαλύτερο μέρος της εικόνας η ταξινόμηση ήταν επιτυχής, με κάποιες αστοχίες (όμοιες με τα προηγούμενα πειράματα) που οφείλονται στη φασματική απεικόνιση των αμπελιών και στην ενδιάμεση βλάστηση στο έδαφος. Η ποσοτική αξιολόγηση δεν παρουσίασε ιδιαίτερη μεταβολή συγκριτικά με το προηγούμενο πείραμα.

	ΑΜΠΕΛΙ	ΕΔΑΦΟΣ	ΑΘΡΟΙΣΜΑ	P.A.
ΑΜΠΕΛΙ	18721.0	274.0	18995.0	0.99
ΕΔΑΦΟΣ	176.0	1541.0	1717.0	0.9
ΑΘΡΟΙΣΜΑ	18897.0	1815.0	kappa:	0.86
U.A.	0.99	0.85	O.A.:	0.98

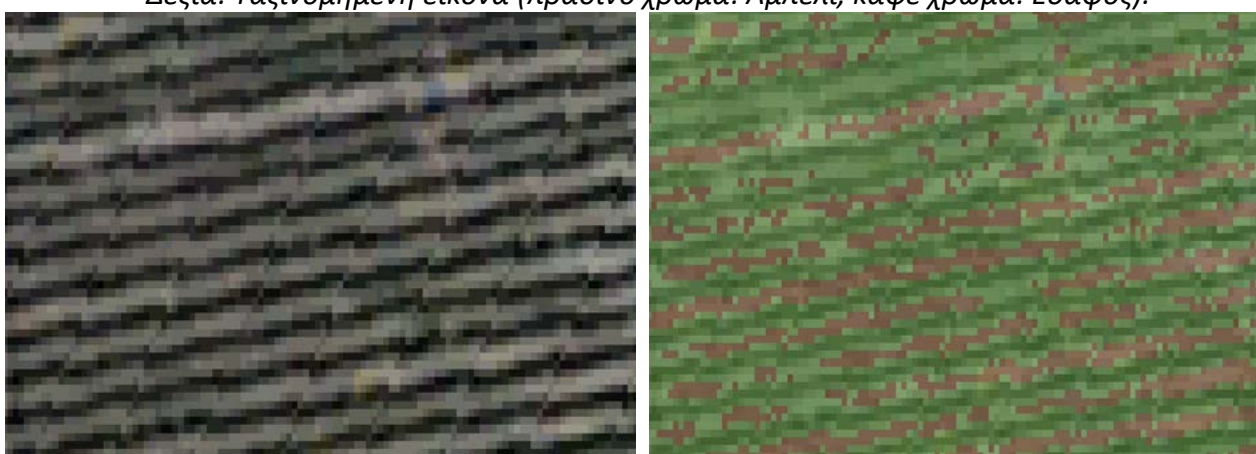
Πίνακας 4.11. Πίνακας Σύγχυσης για πείραμα με ratio = 40% στην περιοχή της Κρήτης.

Πείραμα 5 (ratio = 50%)

Στο τελευταίο πείραμα για την περιοχή της Κρήτης χρησιμοποιήθηκε το 50% των δεδομένων ελέγχου για την εκπαίδευση του αλγορίθμου και το υπόλοιπο 50% για την αξιολόγησή του. Παρακάτω παρουσιάζονται κάποια χαρακτηριστικά παραδείγματα της ταξινόμησης.



Εικόνα 4.24. Επιτυχής ταξινόμηση. Αριστερά: Πολυφασματική δορυφορική εικόνα (RGB). Δεξιά: Ταξινομημένη εικόνα (πράσινο χρώμα: Αμπέλι, καφέ χρώμα: Έδαφος).



Εικόνα 4.25. Άστοχη ταξινόμηση. Αριστερά: Πολυφασματική δορυφορική εικόνα (RGB). Δεξιά: Ταξινομημένη εικόνα (πράσινο χρώμα: Αμπέλι, καφέ χρώμα: Έδαφος).

Τα ποσοτικά αποτελέσματα της ταξινόμησης δεν εμφάνισαν ιδιαίτερη μεταβολή συγκριτικά με τα προηγούμενα πειράματα, εκτός από την αύξηση του kappa (kappa = 0.87) σε σχέση με το Πείραμα 4 (kappa = 0.86).

	ΑΜΠΕΛΙ	ΕΔΑΦΟΣ	ΑΘΡΟΙΣΜΑ	P.A.
ΑΜΠΕΛΙ	15589.0	202.0	15791.0	0.99
ΕΔΑΦΟΣ	158.0	1310.0	1468.0	0.89
ΑΘΡΟΙΣΜΑ	15747.0	1512.0	kappa:	0.87
U.A.	0.99	0.87	O.A.:	0.98

Πίνακας 4.12. Πίνακας Σύγχυσης για πείραμα με ratio = 50% στην περιοχή της Κρήτης.

Η ταξινόμηση που προέκυψε για την περιοχή μελέτης της Κρήτης μέσω των παραπάνω πειραμάτων παρουσιάζεται για μία υποπεριοχή της εικόνας, ώστε να είναι εμφανής ο εντοπισμός του φυλλώματος στην εικόνα.



Εικόνα 4.26. Αποτέλεσμα ταξινόμησης στην περιοχή μελέτης της Κρήτης (πράσινο χρώμα: φύλλωμα).

Για να πραγματοποιηθεί σύγκριση των πειραμάτων για την περιοχή της Κρήτης υπολογίστηκαν κάποια ποσοτικά μεγέθη, ώστε να παραχθεί ένα πιο ολοκληρωμένο συμπέρασμα για την ταξινόμηση της εικόνας.

	Ratio (training – validation)				
	10% - 90%	20% - 80%	30% - 70%	40% - 60%	50% - 50%
O.A.	0.97	0.97	0.98	0.98	0.98
kappa	0.82	0.83	0.86	0.86	0.87
U.A. (average)	0.89	0.9	0.92	0.92	0.93
P.A. (average)	0.93	0.93	0.94	0.94	0.94
F1-score	0.98	0.98	0.98	0.98	0.98

Πίνακας 4.13. Πίνακας Συνολικών Ποσοτικών Αποτελεσμάτων για τα πειράματα στην περιοχή της Κρήτης.

Από τα παραπάνω αποτελέσματα προκύπτει ότι η Ολική Ακρίβεια αυξάνεται όταν χρησιμοποιείται το 30% των δεδομένων ελέγχου για εκπαίδευση και δεν αυξάνεται περαιτέρω όταν χρησιμοποιείται το 40% και το 50% αυτών. Επιπλέον, ο δείκτης kappa, ο μέσος όρος της Ακρίβειας του Χρήστη και ο μέσος όρος της Ακρίβειας του Παραγωγού παρουσιάζουν αύξηση επίσης για την εκπαίδευση του ταξινομητή με το 30% των δεδομένων, σε σχέση με τις αντίστοιχες τιμές τους για εκπαίδευση με το 20% των δεδομένων. Τέλος, ο δείκτης F1-score εμφανίζει ίδια τιμή για όλα τα πειράματα, γεγονός που υποδεικνύει ότι η ακρίβεια και η ανάκληση των δεδομένων που χρησιμοποιήθηκαν στην ταξινόμηση είναι σταθερά υψηλή.

Περιοχή Μελέτης: Δράμα

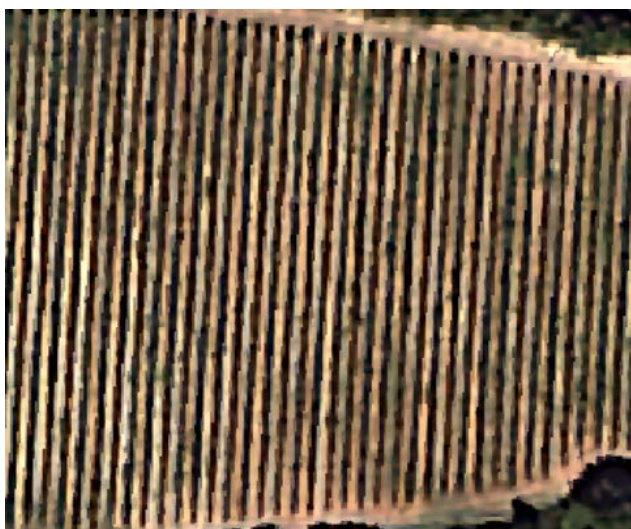
Για την περιοχή μελέτης της Δράμας πραγματοποιήθηκαν έξι πειράματα, με έξι ποσοστά δεδομένων ελέγχου, τα οποία εκπαίδευσαν τον αλγόριθμο. Τα πειράματα υλοποιήθηκαν στο σύνολο των αμπελοτεμαχίων της περιοχής, όπως αυτά παρουσιάζονται στην παρακάτω εικόνα. Λόγω περιορισμένου χώρου, τα αποτελέσματα των πειραμάτων παρατίθενται για υποπεριοχές των αμπελοτεμαχίων, ώστε να είναι ευκρινέστερη η ταξινόμηση που προέκυψε στο εκάστοτε πείραμα.



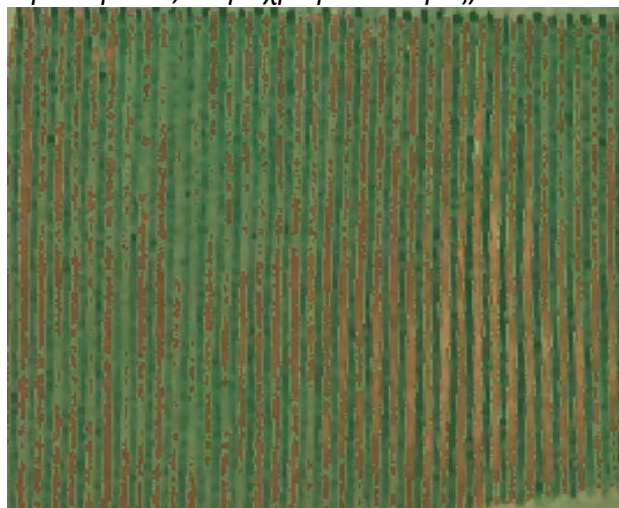
Εικόνα 4.27. Αμπελοτεμάχια περιοχής Δράμας.

Πείραμα 1 (ratio = 50%)

Στο πρώτο πείραμα για την περιοχή μελέτης της Δράμας χρησιμοποιήθηκε το 50% των δεδομένων ελέγχου για την εκπαίδευση του αλγορίθμου και το 50% για την αξιολόγησή του. Λόγω του μεγάλου μεγέθους της εικόνας επιλέχθηκε να χρησιμοποιηθεί το μισό σύνολο δεδομένων για την εκπαίδευση, καθώς οι φασματικές υπογραφές των αμπελιών ήταν ανομοιογενείς. Παρακάτω παρουσιάζονται κάποια ενδεικτικά αποτελέσματα της ταξινόμησης.



Εικόνα 4.28. Επιτυχής ταξινόμηση. Αριστερά: Πολυφασματική δορυφορική εικόνα (RGB).
Δεξιά: Ταξινομημένη εικόνα (πράσινο χρώμα: Αμπέλι, καφέ χρώμα: Έδαφος).



Εικόνα 4.29. Άστοχη ταξινόμηση. Αριστερά: Πολυφασματική δορυφορική εικόνα (RGB).
Δεξιά: Ταξινομημένη εικόνα (πράσινο χρώμα: Αμπέλι, καφέ χρώμα: Έδαφος).

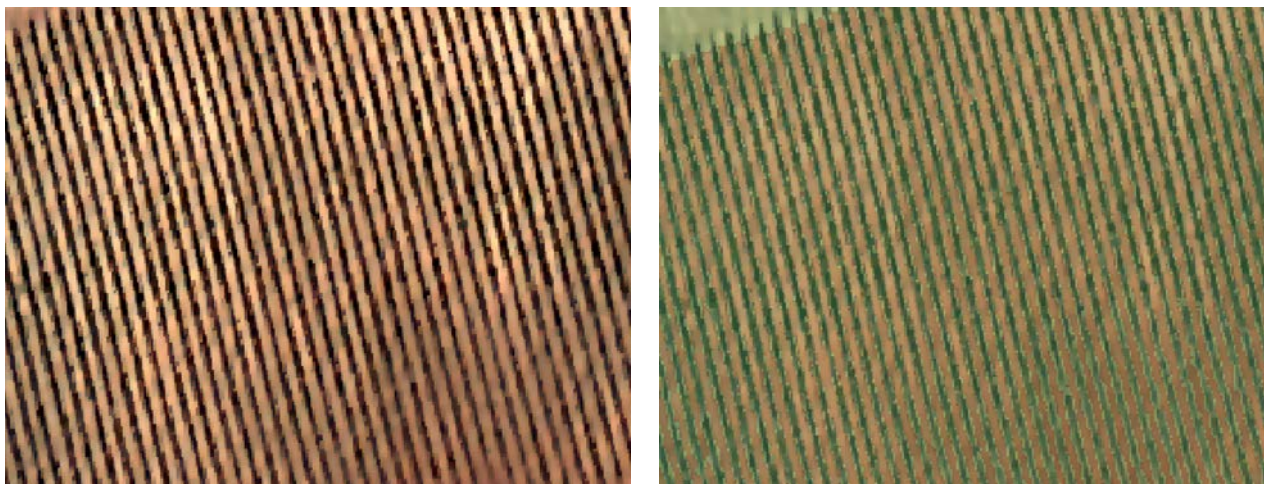
Σύμφωνα με την ποιοτική αξιολόγηση της εικόνας, η ταξινόμηση θεωρείται ικανοποιητική στο μεγαλύτερο μέρος της. Επίσης, η ποσοτική αξιολόγηση της ταξινόμησης καταδεικνύει ότι είναι αρκετά αποτελεσματική και οι αστοχίες που διακρίνονται στην εικόνα 4.24 εντοπίζονται μόνο σε ορισμένα αμπελοτεμάχια, στα οποία τα αμπέλια δεν είναι αναπτυγμένα επαρκώς και η φασματική τους συμπεριφορά μοιάζει με αυτή του ενδιάμεσου εδάφους.

	ΑΜΠΕΛΙ	ΕΔΑΦΟΣ	ΑΘΡΟΙΣΜΑ	P.A.
ΑΜΠΕΛΙ	50891.0	32.0	50923.0	0.99
ΕΔΑΦΟΣ	71.0	4367.0	4438.0	0.98
ΑΘΡΟΙΣΜΑ	50962.0	4399.0	kappa:	0.99
U.A.	0.99	0.99	O.A.:	0.99

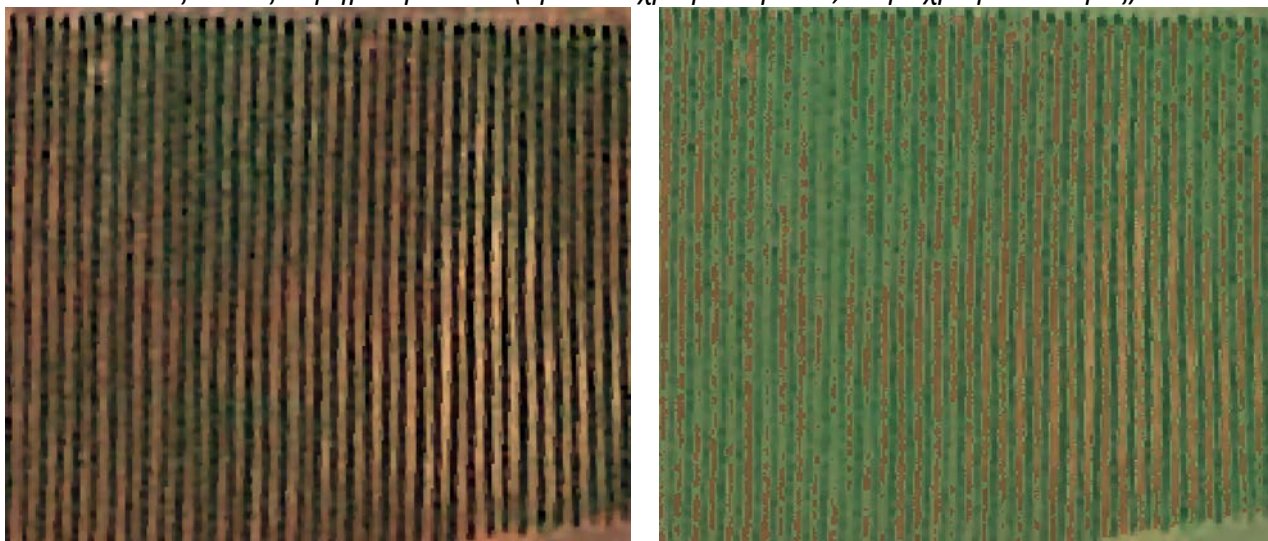
Πίνακας 4.14. Πίνακας Σύγχυσης για πείραμα με ratio = 50% στην περιοχή της Δράμας.

Πείραμα 2 (ratio = 40%)

Στο δεύτερο πείραμα η εκπαίδευση του αλγορίθμου υλοποιήθηκε με το 40% των δεδομένων ελέγχου και το υπόλοιπο 60% χρησιμοποιήθηκε για την αξιολόγησή του. Παρακάτω παρουσιάζονται κάποια χαρακτηριστικά παραδείγματα επιτυχούς και ανεπιτυχούς αξιολόγησης.



Εικόνα 4.30. Επιτυχής ταξινόμηση. Αριστερά: Πολυφασματική δορυφορική εικόνα (RGB). Δεξιά: Ταξινομημένη εικόνα (πράσινο χρώμα: Αμπέλι, καφέ χρώμα: Έδαφος).



Εικόνα 4.31. Άστοχη ταξινόμηση. Αριστερά: Πολυφασματική δορυφορική εικόνα (RGB). Δεξιά: Ταξινομημένη εικόνα (πράσινο χρώμα: Αμπέλι, καφέ χρώμα: Έδαφος).

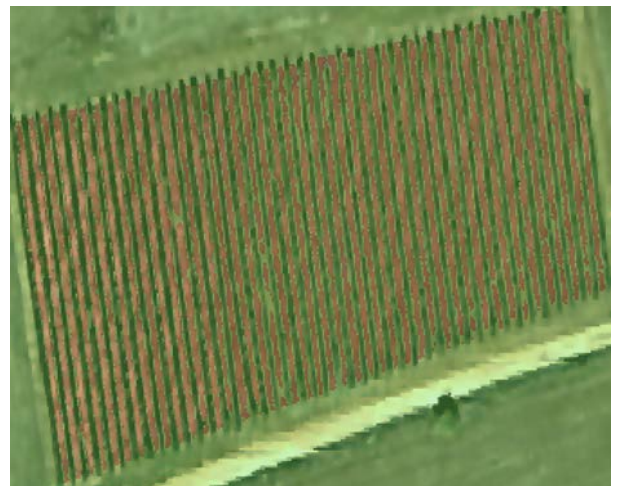
Από την ποιοτική αξιολόγηση προκύπτει ότι η ταξινόμηση ήταν αποτελεσματική. Επιπλέον, τα ποσοτικά μέτρα αξιολόγησης ήταν εξίσου ικανοποιητικά με αυτά του προηγούμενου πειράματος, καθώς η Ολική Ακρίβεια της ταξινόμησης ανέρχεται στο 99%, δηλαδή στο ίδιο ποσοστό με την προηγούμενη ταξινόμηση.

	ΑΜΠΕΛΙ	ΕΔΑΦΟΣ	ΑΘΡΟΙΣΜΑ	P.A.
ΑΜΠΕΛΙ	61082.0	76.0	61158.0	0.99
ΕΔΑΦΟΣ	72.0	5203.0	5275.0	0.99
ΑΘΡΟΙΣΜΑ	61154.0	5279.0	κappa:	0.98
U.A.	0.99	0.99	O.A.:	0.99

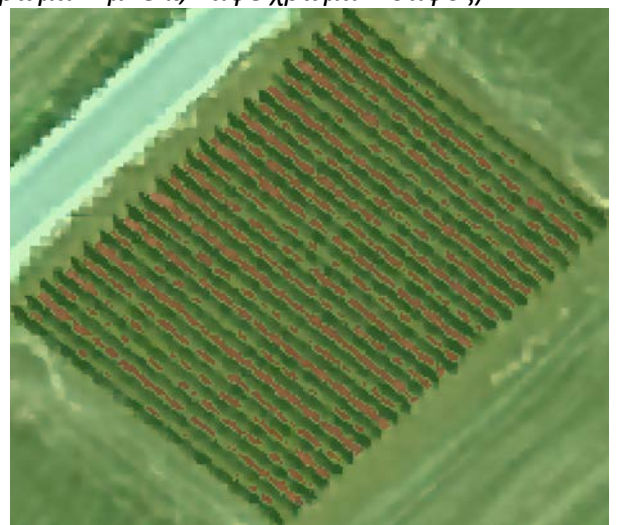
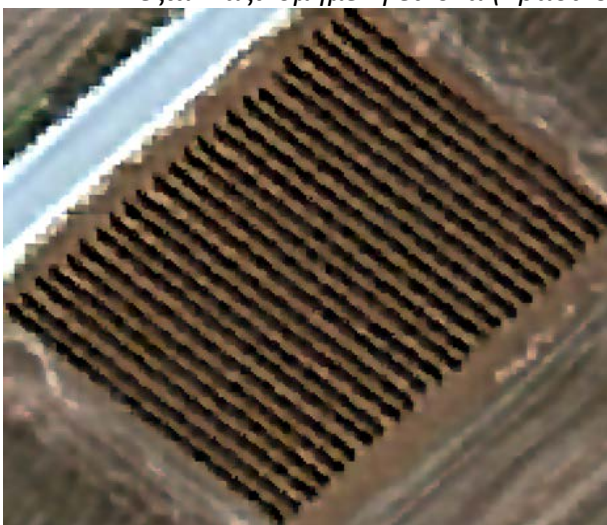
Πίνακας 4.15. Πίνακας Σύγχυσης για πείραμα με ratio = 40% στην περιοχή της Δράμας.

Πείραμα 3 (ratio = 30%)

Στο τρίτο πείραμα που υλοποιήθηκε για την περιοχή μελέτης της Δράμας χρησιμοποιήθηκε το 30% των δεδομένων ελέγχου για την εκπαίδευση του ταξινομητή και το υπόλοιπο 70% για την αξιολόγησή του. Παρακάτω παρουσιάζονται κάποια ενδεικτικά παραδείγματα ταξινόμησης.



Εικόνα 4.32. Επιτυχής ταξινόμηση. Αριστερά: Πολυφασματική δορυφορική εικόνα (RGB). Δεξιά: Ταξινομημένη εικόνα (πράσινο χρώμα: Αμπέλι, καφέ χρώμα: Έδαφος).



Εικόνα 4.33. Άστοχη ταξινόμηση. Αριστερά: Πολυφασματική δορυφορική εικόνα (RGB). Δεξιά: Ταξινομημένη εικόνα (πράσινο χρώμα: Αμπέλι, καφέ χρώμα: Έδαφος).

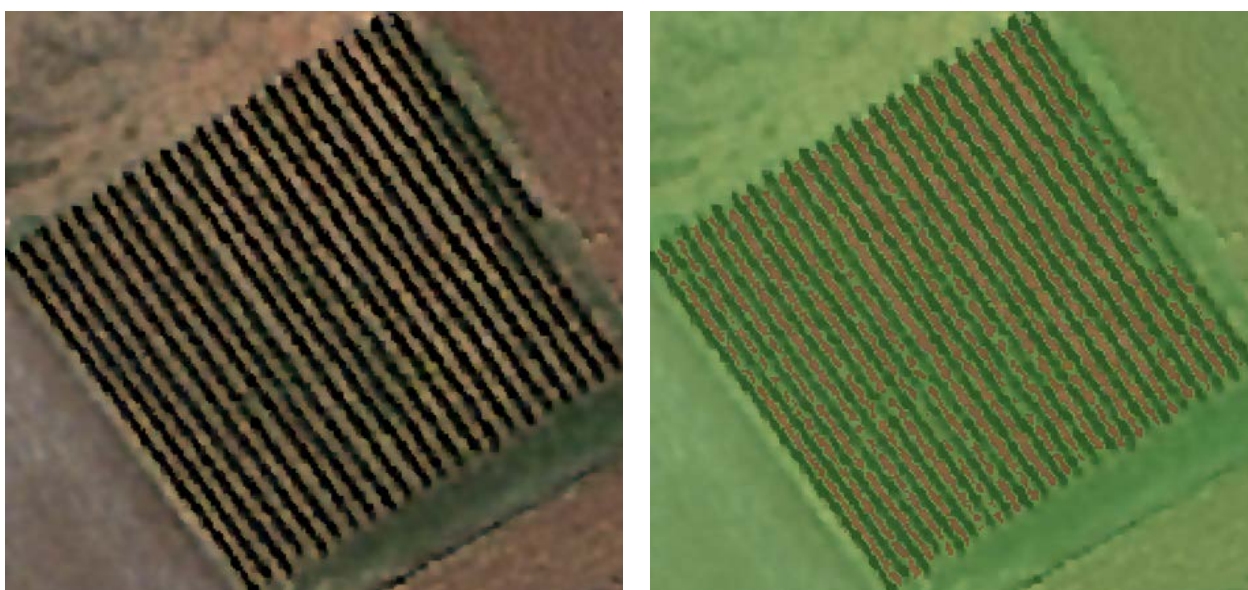
Τόσο η ποιοτική όσο και η ποσοτική αξιολόγηση του πειράματος καταδεικνύουν ότι η ταξινόμηση είναι επιτυχής στο μεγαλύτερο μέρος της εικόνας, καθώς η Ολική Ακρίβεια του πειράματος ανέρχεται στο 99% και το kappa ισούται με 0,99. Κάποιες αστοχίες υπήρξαν σε αμπελοτεμάχια όπου η φασματική υπογραφή των πρέμνων και του ενδιάμεσου εδάφους είναι παρόμοιες, λόγω ύπαρξης αυτοφυούς βλάστησης μεταξύ των φυτών. Τα μέτρα ποσοτικής αξιολόγησης του πειράματος παρατίθενται παρακάτω.

	ΑΜΠΕΛΙ	ΕΔΑΦΟΣ	ΑΘΡΟΙΣΜΑ	P.A.
ΑΜΠΕΛΙ	71243.0	59.0	71302.0	0.99
ΕΔΑΦΟΣ	104.0	6099.0	6203.0	0.98
ΑΘΡΟΙΣΜΑ	71347.0	6158.0	kappa:	0.99
U.A.	0.99	0.99	O.A.:	0.99

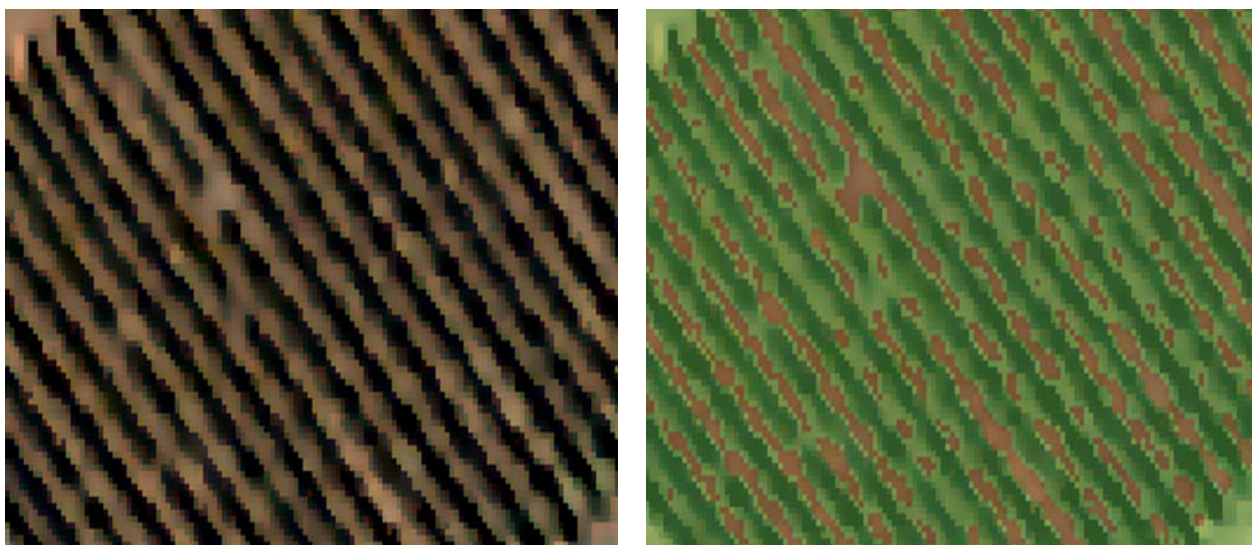
Πίνακας 4.16. Πίνακας Σύγχυσης για πείραμα με ratio = 30% στην περιοχή της Δράμας.

Πείραμα 4 (ratio = 20%)

Καθώς τα προηγούμενα πειράματα απέδωσαν αρκετά ικανοποιητικά αποτελέσματα, αποφασίστηκε να συνεχιστεί η πειραματική διαδικασία με χαμηλότερα ποσοστά δεδομένων εκπαίδευσης του αλγορίθμου. Για το λόγο αυτό, στο τέταρτο πείραμα χρησιμοποιήθηκε 20% των δεδομένων ελέγχου για εκπαίδευση και 80% για αξιολόγηση του ταξινομητή. Από την ποιοτική αξιολόγηση της ταξινόμησης προκύπτει ότι είναι επιτυχές το αποτέλεσμα για το μεγαλύτερο μέρος της εικόνας. Παρακάτω παρουσιάζονται κάποια τμήματα της ταξινομημένης εικόνας.



Εικόνα 4.34. Επιτυχής ταξινόμηση. Αριστερά: Πολυφασματική δορυφορική εικόνα (RGB). Δεξιά: Ταξινομημένη εικόνα (πράσινο χρώμα: Αμπέλι, καφέ χρώμα: Έδαφος).



Εικόνα 4.35. Άστοχη ταξινόμηση. Αριστερά: Πολυφασματική δορυφορική εικόνα (RGB). Δεξιά: Ταξινομημένη εικόνα (πράσινο χρώμα: Αμπέλι, καφέ χρώμα: Έδαφος).

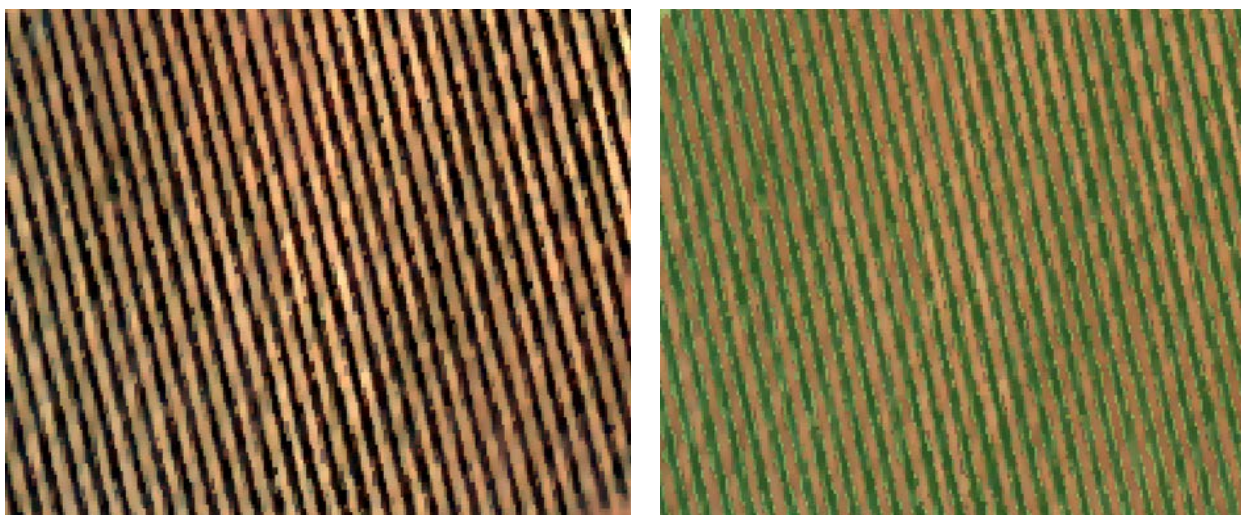
Παρότι χρησιμοποιήθηκαν λιγότερα δεδομένα ελέγχου για την εκπαίδευση του ταξινομητή, η Ολική Ακρίβεια της ταξινόμησης παρέμεινε σταθερή (Ο.Α. = 0,99). Μόνο ο δείκτης kappa παρουσίασε μικρή πτώση συγκριτικά με το προηγούμενο πείραμα ($kappa_{30\%} = 0,99$ και $kappa_{20\%} = 0,98$). Επομένως, κάποιες αστοχίες που προέκυψαν στην ταξινόμηση οφείλονται όπως και στα προηγούμενα πειράματα στην ομοιότητα των φασματικών υπογραφών των αμπελιών και του εδάφους σε ορισμένα αμπελοτεμάχια, που δε δέχονται καλλιεργητική φροντίδα.

	ΑΜΠΕΛΙ	ΕΔΑΦΟΣ	ΑΘΡΟΙΣΜΑ	P.A.
ΑΜΠΕΛΙ	81399.0	69.0	81468.0	0.99
ΕΔΑΦΟΣ	140.0	6969.0	7109.0	0.98
ΑΘΡΟΙΣΜΑ	81539.0	7038.0	kappa:	0.98
U.A.	0.99	0.99	O.A.:	0.99

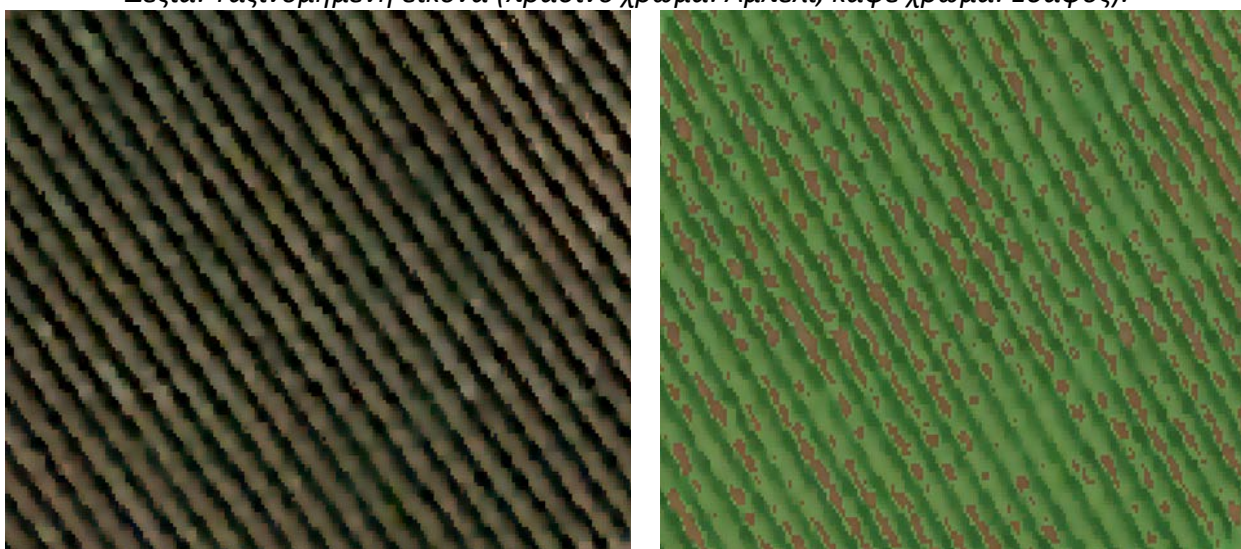
Πίνακας 4.17. Πίνακας Σύγχυσης για πείραμα με ratio = 20% στην περιοχή της Δράμας.

Πείραμα 5 (ratio = 10%)

Στο πέμπτο πείραμα χρησιμοποιήθηκε το 10% των δεδομένων ελέγχου για την εκπαίδευση του αλγορίθμου και το 90% για την αξιολόγησή του. Και αυτό το πείραμα επέφερε επιτυχή ταξινόμηση στο μεγαλύτερο μέρος της εικόνας, διατηρώντας ορισμένες αστοχίες στην ταξινόμηση των εικονοστοιχείων του εδάφους σε κάποια αμπελοτεμάχια, όπως και στα προηγούμενα πειράματα. Ενδεικτικά παραδείγματα παρουσιάζονται παρακάτω.



Εικόνα 4.36. Επιτυχής ταξινόμηση. Αριστερά: Πολυφασματική δορυφορική εικόνα (RGB). Δεξιά: Ταξινομημένη εικόνα (πράσινο χρώμα: Αμπέλι, καφέ χρώμα: Έδαφος).



Εικόνα 4.37. Αστοχη ταξινόμηση. Αριστερά: Πολυφασματική δορυφορική εικόνα (RGB). Δεξιά: Ταξινομημένη εικόνα (πράσινο χρώμα: Αμπέλι, καφέ χρώμα: Έδαφος).

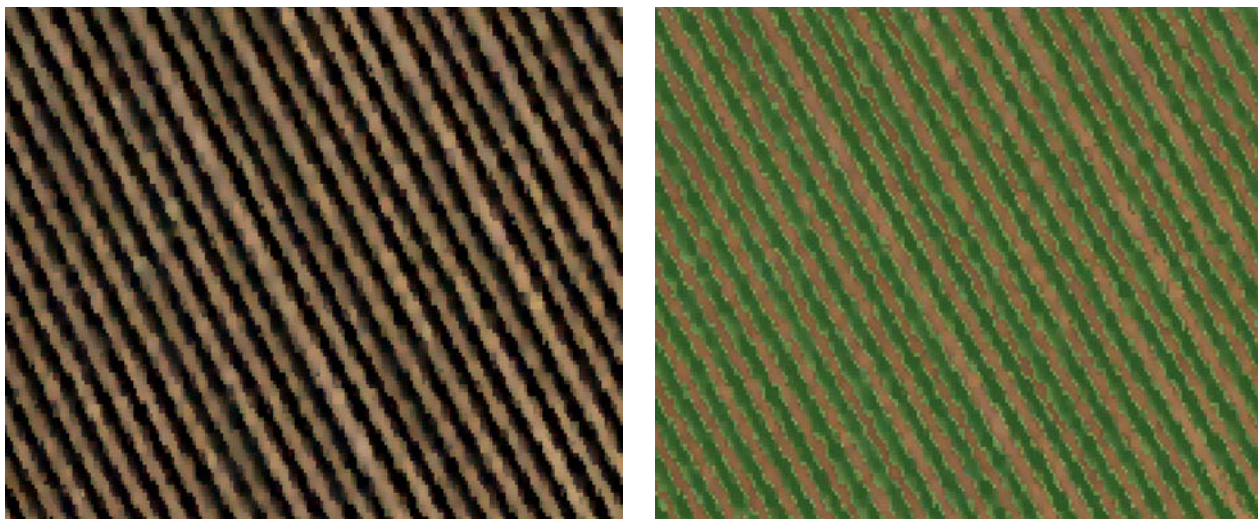
Από την ποσοτική αξιολόγηση του πειράματος προκύπτει ότι η ταξινόμηση είναι σταθερά επιτυχής όπως και στα προηγούμενα πειράματα, καθώς η Ολική Ακρίβεια παραμένει αμείωτη. Τα μέτρα ποσοτικής αξιολόγησης παρουσιάζονται παρακάτω.

	ΑΜΠΕΛΙ	ΕΔΑΦΟΣ	ΑΘΡΟΙΣΜΑ	P.A.
ΑΜΠΕΛΙ	91570.0	148.0	91718.0	0.99
ΕΔΑΦΟΣ	161.0	7770.0	7931.0	0.98
ΑΘΡΟΙΣΜΑ	91731.0	7918.0	kappa:	0.98
U.A.	0.99	0.98	O.A.:	0.99

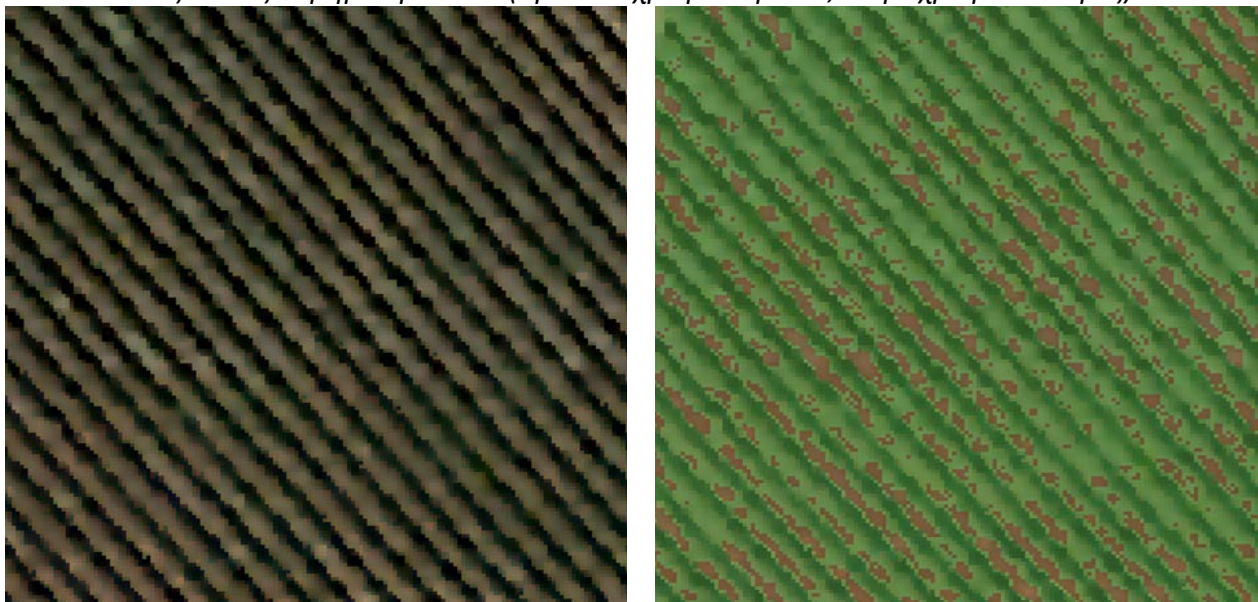
Πίνακας 4.18. Πίνακας Σύγχυσης για πείραμα με ratio = 10% στην περιοχή της Δράμας.

Πείραμα 6 (ratio = 5%)

Λόγω της επαρκούς αποτελεσματικότητας της ταξινόμησης στα παραπάνω πειράματα, υλοποιήθηκε ένα ακόμα πείραμα με χρήση του 5% των δεδομένων ελέγχου για εκπαίδευση και του 95% για αξιολόγηση του ταξινομητή. Με αυτό τον τρόπο έγινε προσπάθεια προσδιορισμού της αποτελεσματικότητας του αλγορίθμου, εκπαιδεύοντάς τον με πολύ μικρό ποσοστό δεδομένων. Με βάση την ποιοτική εκτίμηση, η ταξινόμηση θεωρείται επιτυχής, διατηρώντας κάποιες από τις αστοχίες που αναφέρθηκαν παραπάνω σε εντοπισμένα σημεία.



Εικόνα 4.38. Επιτυχής ταξινόμηση. Αριστερά: Πολυφασματική δορυφορική εικόνα (RGB). Δεξιά: Ταξινομημένη εικόνα (πράσινο χρώμα: Αμπέλι, καφέ χρώμα: Έδαφος).



Εικόνα 4.39. Άστοχη ταξινόμηση. Αριστερά: Πολυφασματική δορυφορική εικόνα (RGB). Δεξιά: Ταξινομημένη εικόνα (πράσινο χρώμα: Αμπέλι, καφέ χρώμα: Έδαφος).

Η ποσοτική αξιολόγηση κατέδειξε επιτυχή ταξινόμηση, με την Ολική Ακρίβεια να διατηρείται αμείωτη στο 99%. Επομένως, ακόμα και με μικρό σύνολο δεδομένων εκπαίδευσης ο αλγόριθμος ανταποκρίθηκε ταξινομώντας ορθά το μεγαλύτερο μέρος των εικονοστοιχείων. Τα μέτρα ποσοτικής αξιολόγησης παρατίθενται παρακάτω.

	ΑΜΠΕΛΙ	ΕΔΑΦΟΣ	ΑΘΡΟΙΣΜΑ	P.A.
ΑΜΠΕΛΙ	96637.0	110.0	96747.0	0.99
ΕΔΑΦΟΣ	190.0	8248.0	8438.0	0.98
ΑΘΡΟΙΣΜΑ	96827.0	8358.0	καρρα:	0.98
Υ.Α.	0.99	0.99	Ο.Α.:	0.99

Πίνακας 4.19. Πίνακας Σύγχυσης για πείραμα με $ratio = 5\%$ στην περιοχή της Δράμας.

Η ταξινόμηση που προέκυψε για την περιοχή μελέτης της Δράμας μέσω των παραπάνω πειραμάτων παρουσιάζεται για μία υποπεριοχή της εικόνας, ώστε να είναι εμφανής ο εντοπισμός του φυλλώματος στην εικόνα.



Εικόνα 4.40. Αποτέλεσμα ταξινόμησης στην περιοχή μελέτης της Δράμας (πράσινο χρώμα: φυλλωμα).

Για τη συγκριτική αξιολόγηση των έξι πειραμάτων που έλαβαν χώρα για την περιοχή μελέτης της Δράμας, παρουσιάζονται συγκεντρωτικά οι ποσοτικοί τους δείκτες.

	Ratio (training – validation)					
	5% - 95%	10% - 90%	20% - 80%	30% - 70%	40% - 60%	50% - 50%
O.A.	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99
kappa	0.98	0.98	0.98	0.99	0.98	0.99
U.A. (average)	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99
P.A. (average)	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99
F1-score	0.98	0.98	0.98	0.98	0.98	0.98

Πίνακας 4.20. Πίνακας Συνολικών Ποσοτικών Αποτελεσμάτων για τα πειράματα στην περιοχή της Δράμας.

Από τα συγκεντρωτικά ποσοτικά αποτελέσματα προκύπτει ότι το ποσοστό δεδομένων ελέγχου που χρησιμοποιούνται για την εκπαίδευση του αλγορίθμου δεν επηρεάζει την αποτελεσματικότητα της ταξινόμησης, με την Ολική Ακρίβεια να παραμένει σταθερή στο 99% για όλα τα πειράματα. Μικρή μεταβολή εμφανίζεται μόνο στις τιμές του δείκτη kappa, όπου στα πειράματα που χρησιμοποιήθηκε το 30% και το 50% των δεδομένων ελέγχου για την εκπαίδευση η τιμή του kappa αυξήθηκε. Συμπερασματικά, με βάση την ποιοτική και την ποσοτική αξιολόγηση των πειραμάτων, η ταξινόμηση της περιοχής μελέτης της Δράμας κρίνεται επιτυχής.

Περιοχή Μελέτης: Επανομή

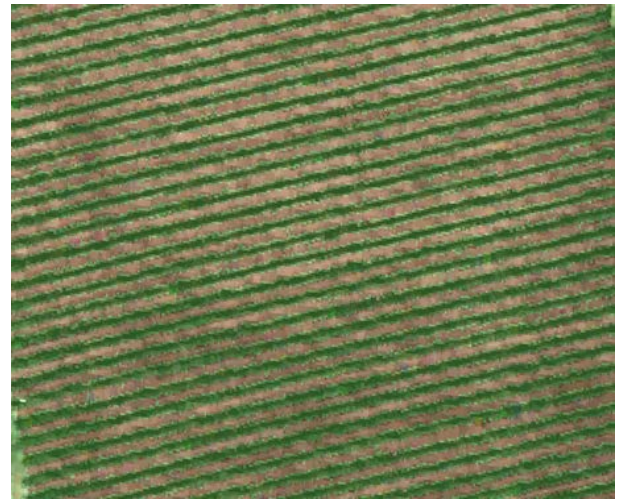
Για την περιοχή μελέτης της Επανομής υλοποιήθηκαν πέντε πειράματα, με πέντε διαφορετικά ποσοστά δεδομένων εκπαίδευσης. Τα πειράματα καθώς και τα αποτελέσματά τους αναλύονται παρακάτω. Τα πειράματα υλοποιήθηκαν στο σύνολο των αμπελοτεμαχίων της περιοχής, όπως αυτά παρουσιάζονται στην παρακάτω εικόνα. Λόγω περιορισμένου χώρου, τα αποτελέσματα των πειραμάτων παρατίθενται για υποπεριοχές των αμπελοτεμαχίων, ώστε να είναι ευκρινέστερη η ταξινόμηση που προέκυψε στο εκάστοτε πείραμα.



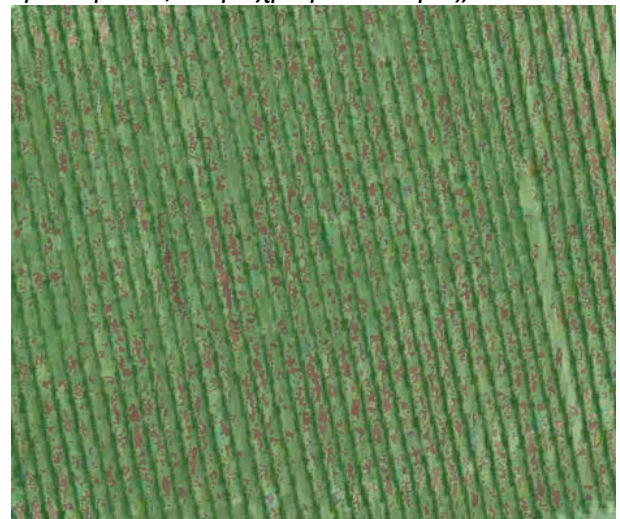
Εικόνα 4.41. Αμπελοτεμάχια περιοχής Επανομής.

Πείραμα 1 (ratio = 50%)

Στο πρώτο πείραμα χρησιμοποιήθηκε το 50% των δεδομένων ελέγχου για την εκπαίδευση του αλγορίθμου και το υπόλοιπο 50% των δεδομένων για την αξιολόγησή του. Σύμφωνα με την ποιοτική αξιολόγηση, η ταξινόμηση θεωρείται επιτυχής.



Εικόνα 4.42. Επιτυχής ταξινόμηση. Αριστερά: Πολυφασματική δορυφορική εικόνα (RGB). Δεξιά: Ταξινομημένη εικόνα (πράσινο χρώμα: Αμπέλι, καφέ χρώμα: Έδαφος).



Εικόνα 4.43. Άστοχη ταξινόμηση. Αριστερά: Πολυφασματική δορυφορική εικόνα (RGB). Δεξιά: Ταξινομημένη εικόνα (πράσινο χρώμα: Αμπέλι, καφέ χρώμα: Έδαφος).

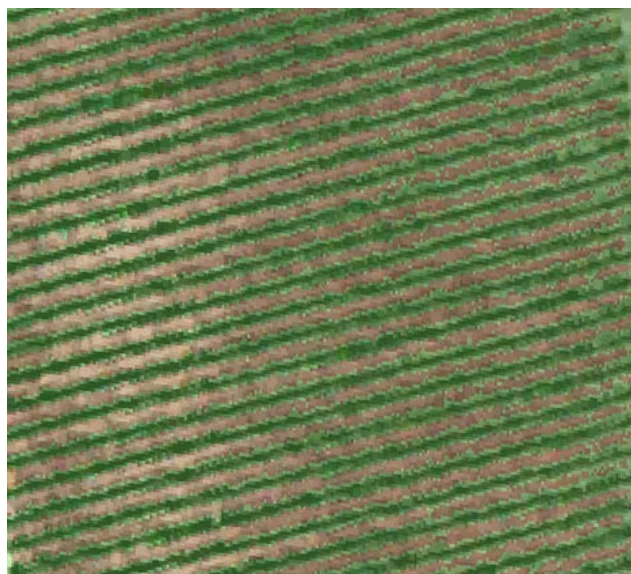
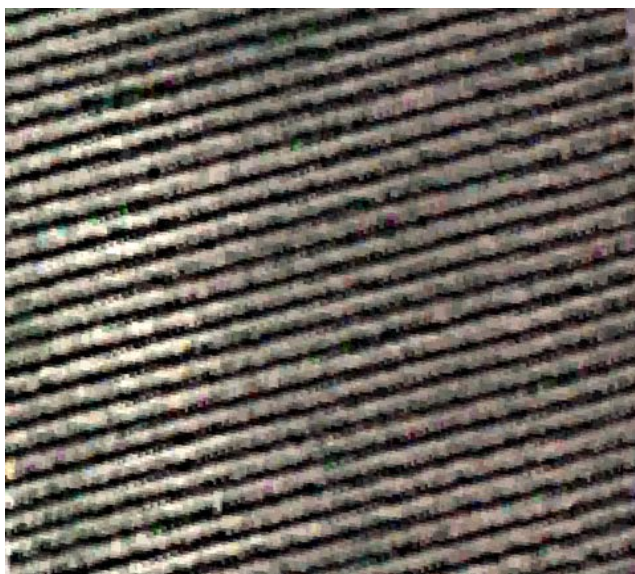
Σε κάποια σημεία παρατηρούνται αστοχίες στην ταξινόμηση, που οφείλονται στην κατάσταση του εδάφους που παρεμβάλλεται μεταξύ των γραμμών των πρέμνων. Όπως φαίνεται στην πολυφασματική δορυφορική εικόνα, το έδαφος έχει παρόμοια φασματική συμπεριφορά με τα αμπέλια καθώς μπορεί να καλύπτεται από αυτοφυή βλάστηση ή να διαθέτει υπερβολική υγρασία. Σε όσα σημεία στην περιοχή μελέτης τα εδάφη είχαν αυτή τη φασματική συμπεριφορά, υπήρξε αστοχία στην ταξινόμηση. Η ποσοτική αξιολόγηση καταδεικνύει ότι σε μεγάλο βαθμό είναι μία επιτυχής ταξινόμηση, καθώς η Ολική Ακρίβεια φτάνει το 99% και ο δείκτης kappa ισούται με 0,88.

	ΑΜΠΕΛΙ	ΕΔΑΦΟΣ	ΑΘΡΟΙΣΜΑ	P.A.
ΑΜΠΕΛΙ	80821.0	690.0	81511.0	0.99
ΕΔΑΦΟΣ	388.0	4407.0	4795.0	0.92
ΑΘΡΟΙΣΜΑ	81209.0	5097.0	kappa:	0.88
U.A.	0.99	0.86	O.A.:	0.99

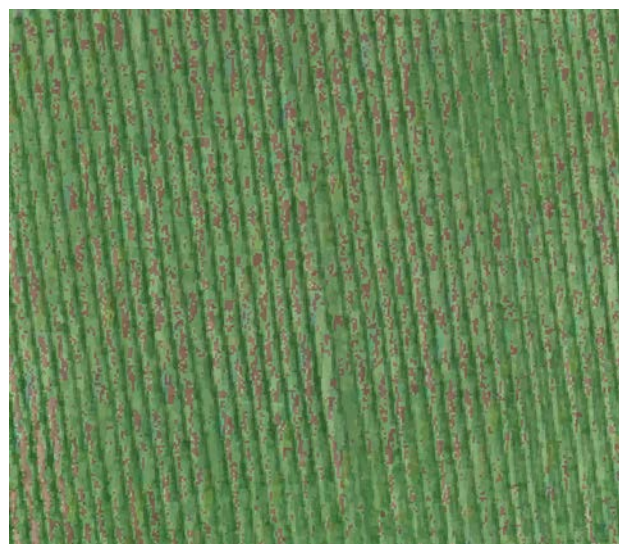
Πίνακας 4.21. Πίνακας Σύγχυσης για πείραμα με ratio = 50% στην περιοχή της Επανομής.

Πείραμα 2 (ratio = 40%)

Στο δεύτερο πείραμα χρησιμοποιήθηκε το 40% των δεδομένων ελέγχου για την εκπαίδευση του αλγορίθμου και το υπόλοιπο 60% για την αξιολόγησή του. Ποιοτικά η ταξινόμηση θεωρείται ικανοποιητική, με τα ίδια προβλήματα που παρουσιάστηκαν και στο προηγούμενο πείραμα.



Εικόνα 4.44. Επιτυχής ταξινόμηση. Αριστερά: Πολυφασματική δορυφορική εικόνα (RGB). Δεξιά: Ταξινομημένη εικόνα (πράσινο χρώμα: Αμπέλι, καφέ χρώμα: Έδαφος).



Εικόνα 4.45. Άστοχη ταξινόμηση. Αριστερά: Πολυφασματική δορυφορική εικόνα (RGB). Δεξιά: Ταξινομημένη εικόνα (πράσινο χρώμα: Αμπέλι, καφέ χρώμα: Έδαφος).

Οι αστοχίες αυτής της ταξινόμησης είναι ίδιες με αυτές του πρώτου πειράματος και οφείλονται στη φασματική συμπεριφορά των εικονοστοιχείων του εδάφους που

μοιάζει με αυτή των εικονοστοιχείων αμπέλου. Για το λόγο αυτό κάποια εικονοστοιχεία εδάφους κατηγοριοποιούνται στην κατηγορία Αμπέλι.

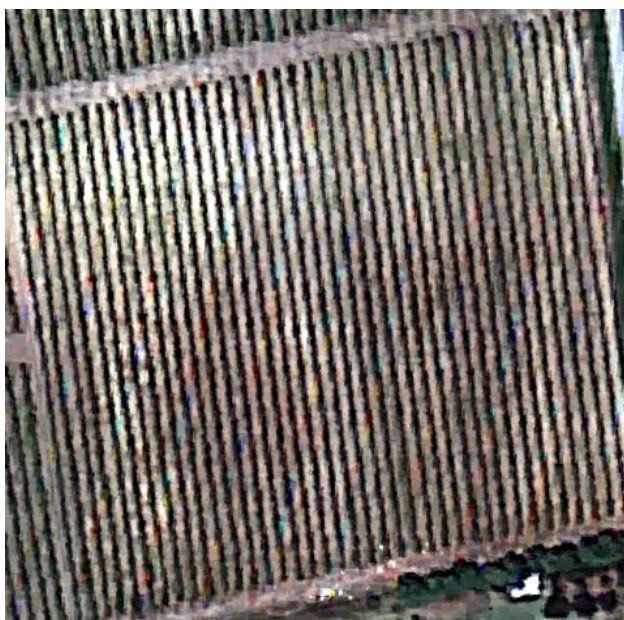
Σύμφωνα με τα ποσοτικά μέτρα αξιολόγησης, η ταξινόμηση είναι εξίσου επιτυχής με την προηγούμενη, καθώς η Ολική Ακρίβεια παραμένει ίση με 99%. Μία διαφορά προέκυψε στο δείκτη kappa, ο οποίος μειώθηκε σε σχέση με το προηγούμενο πείραμα κατά 0,01.

	ΑΜΠΕΛΙ	ΕΔΑΦΟΣ	ΑΘΡΟΙΣΜΑ	P.A.
ΑΜΠΕΛΙ	96989.0	942.0	97931.0	0.99
ΕΔΑΦΟΣ	462.0	5174.0	5636.0	0.92
ΑΘΡΟΙΣΜΑ	97451.0	6116.0	kappa:	0.87
U.A.	0.99	0.85	O.A.:	0.99

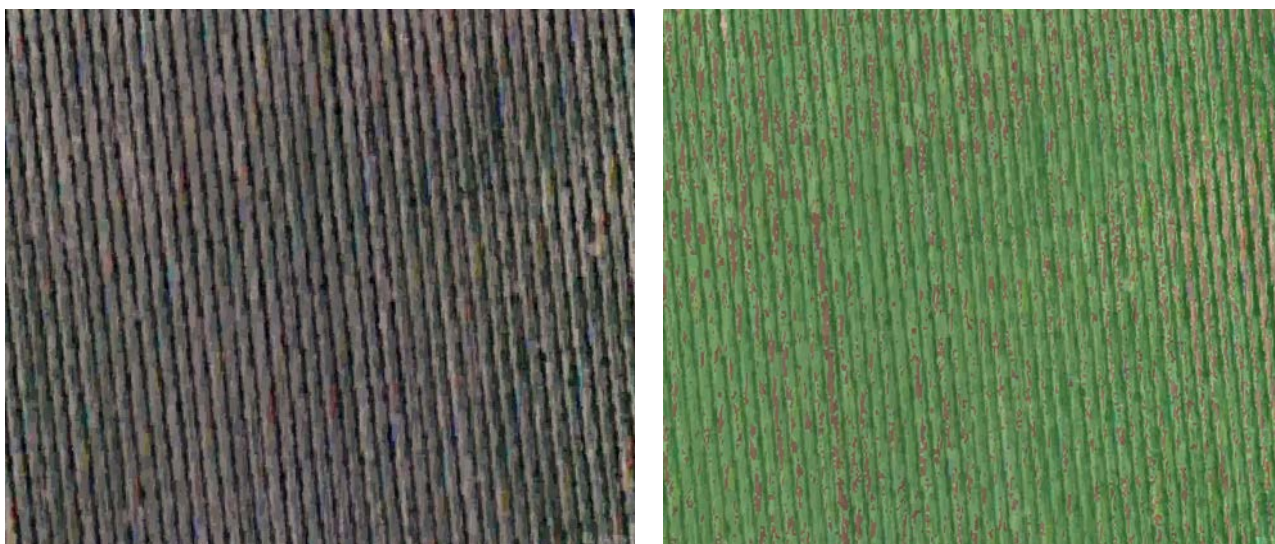
Πίνακας 4.22. Πίνακας Σύγχυσης για πείραμα με ratio = 40% στην περιοχή της Επανομής.

Πείραμα 3 (ratio = 30%)

Στο τρίτο πείραμα χρησιμοποιήθηκε το 30% των δεδομένων ελέγχου για εκπαίδευση του ταξινομητή και το 70% για την αξιολόγησή του. Ποιοτικά η αξιολόγηση κρίνεται επιτυχής, με τις ίδιες αστοχίες που προέκυψαν και στα δύο προηγούμενα πειράματα, χωρίς κάποια επιπλέον βελτίωση. Παρακάτω παρουσιάζονται κάποια χαρακτηριστικά παραδείγματα.



Εικόνα 4.46. Επιτυχής ταξινόμηση. Αριστερά: Πολυφασματική δορυφορική εικόνα (RGB). Δεξιά: Ταξινομημένη εικόνα (πράσινο χρώμα: Αμπέλι, καφέ χρώμα: Έδαφος).



Εικόνα 4.47. Αστοχη ταξινόμηση. Αριστερά: Πολυφασματική δορυφορική εικόνα (RGB). Δεξιά: Ταξινομημένη εικόνα (πράσινο χρώμα: Αμπέλι, καφέ χρώμα: Έδαφος).

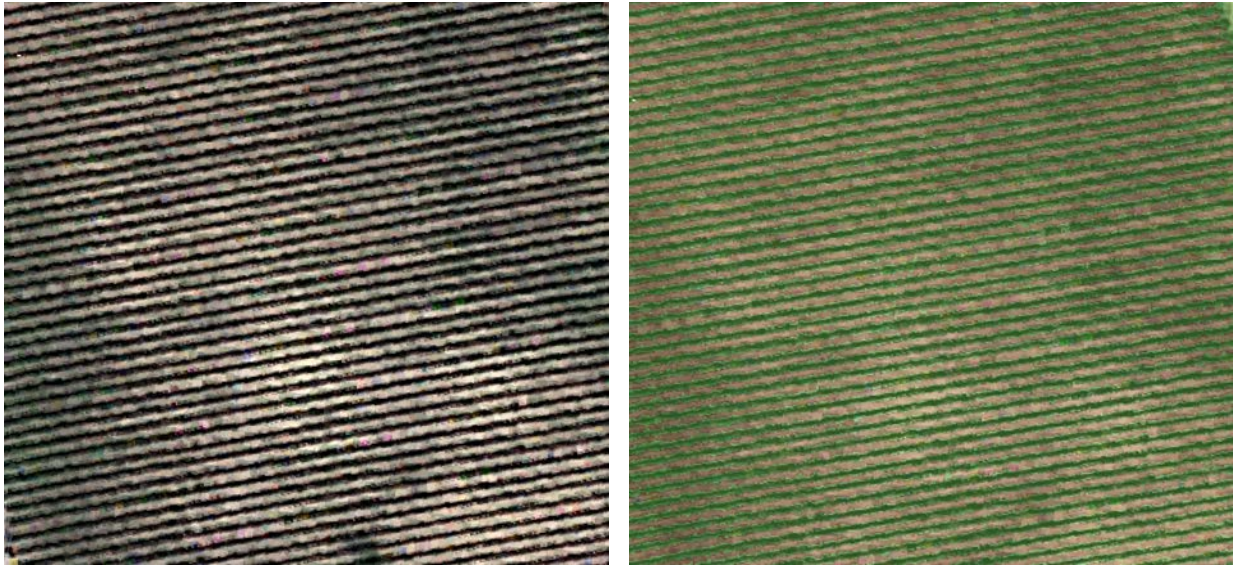
Παρακάτω παρατίθενται τα ποσοτικά μέτρα αξιολόγησης της ταξινόμησης. Δεν παρατηρήθηκε καμία μεταβολή στην Ολική Ακρίβεια και στο δείκτη kappa σε σχέση με το προηγούμενο πείραμα.

	ΑΜΠΕΛΙ	ΕΔΑΦΟΣ	ΑΘΡΟΙΣΜΑ	P.A.
ΑΜΠΕΛΙ	113089.0	1137.0	114226.0	0.99
ΕΔΑΦΟΣ	604.0	5999.0	6603.0	0.91
ΑΘΡΟΙΣΜΑ	113693.0	7136.0	kappa:	0.87
U.A.	0.99	0.84	O.A.:	0.99

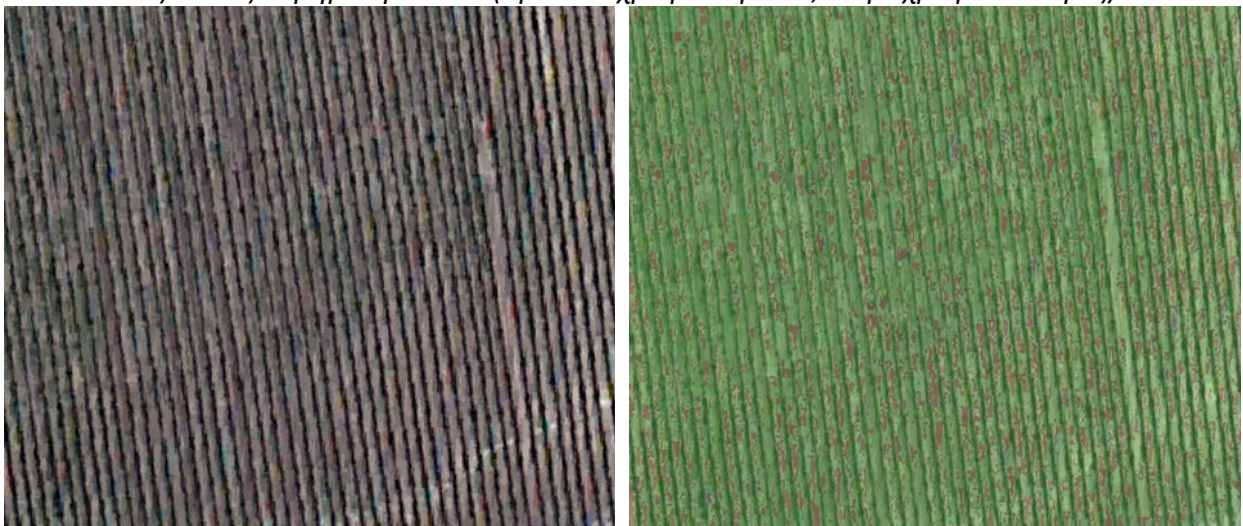
Πίνακας 4.23. Πίνακας Σύγχυσης για πείραμα με ratio = 30% στην περιοχή της Επανομής.

Πείραμα 4 (ratio = 20%)

Για την εκπαίδευση του αλγορίθμου χρησιμοποιήθηκε το 20% των δεδομένων ελέγχου και για την αξιολόγησή του το 80% αυτών. Η ταξινόμηση είναι επιτυχής στο μεγαλύτερο μέρος της εικόνας, σύμφωνα με την ποιοτική αξιολόγηση. Παρακάτω παρουσιάζονται κάποια ενδεικτικά αποτελέσματα της ταξινόμησης.



Εικόνα 4.48. Επιτυχής ταξινόμηση. Αριστερά: Πολυφασματική δορυφορική εικόνα (RGB). Δεξιά: Ταξινομημένη εικόνα (πράσινο χρώμα: Αμπέλι, καφέ χρώμα: Έδαφος).



Εικόνα 4.49. Άστοχη ταξινόμηση. Αριστερά: Πολυφασματική δορυφορική εικόνα (RGB). Δεξιά: Ταξινομημένη εικόνα (πράσινο χρώμα: Αμπέλι, καφέ χρώμα: Έδαφος).

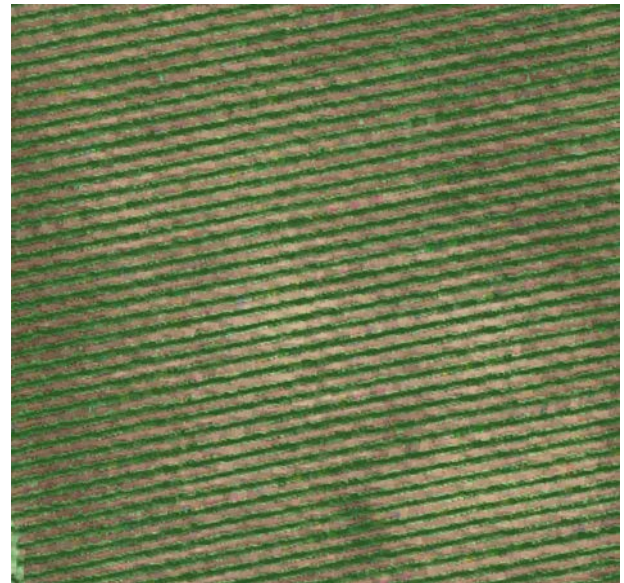
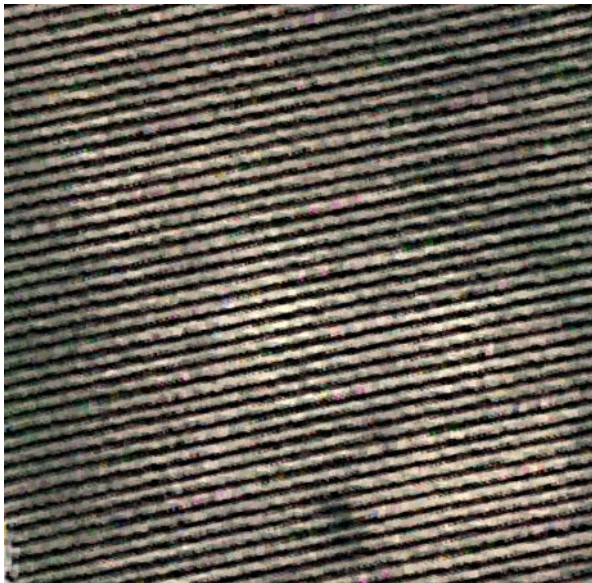
Η ποσοτική αξιολόγηση της ταξινόμησης κατέδειξε μία μείωση στις τιμές της Ολικής Ακρίβειας και του δείκτη kappa συγκριτικά με τα προηγούμενα πειράματα. Αυτό δικαιολογείται από το γεγονός ότι οι αστοχίες συνεχίζουν να είναι εντοπισμένες σε συγκεκριμένα σημεία, όπου υπάρχει ενδιάμεση βλάστηση, αλλά χρησιμοποιήθηκε μικρότερο ποσοστό δεδομένων εκπαίδευσης. Παρακάτω παρουσιάζονται τα ποσοτικά αποτελέσματα.

	ΑΜΠΕΛΙ	ΕΔΑΦΟΣ	ΑΘΡΟΙΣΜΑ	P.A.
ΑΜΠΕΛΙ	129149.0	1375.0	130524.0	0.99
ΕΔΑΦΟΣ	786.0	6780.0	7566.0	0.9
ΑΘΡΟΙΣΜΑ	129935.0	8155.0	κappa:	0.85
U.A.	0.99	0.83	O.A.:	0.98

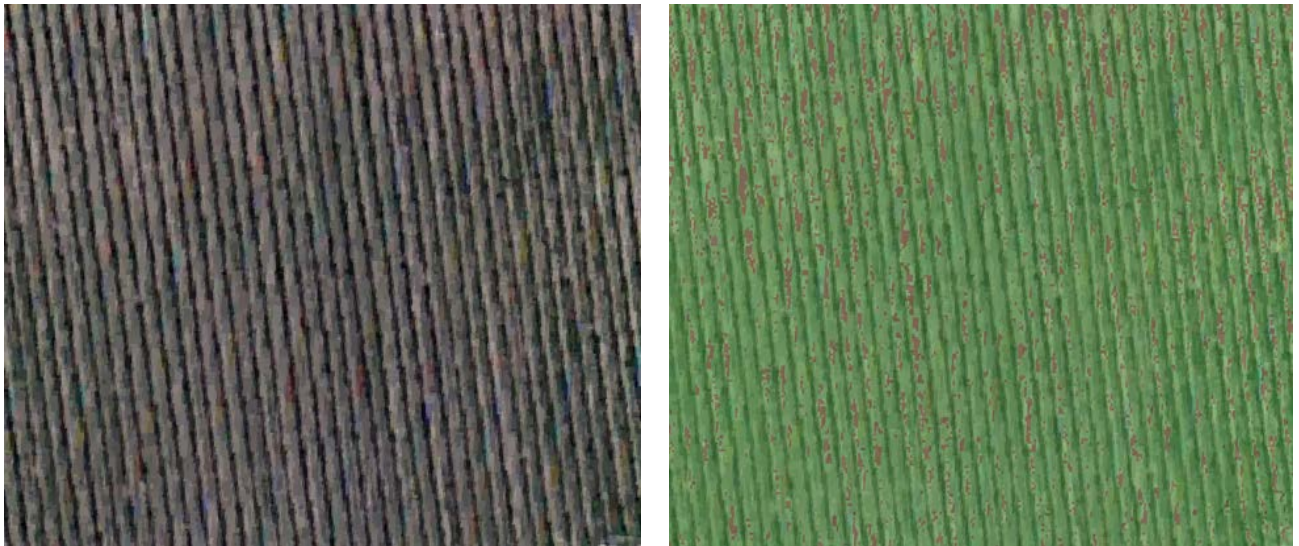
Πίνακας 4.24. Πίνακας Σύγχυσης για πείραμα με ratio = 20% στην περιοχή της Επανομής.

Πείραμα 5 (ratio = 10%)

Στο τελευταίο πείραμα για την περιοχή της Επανομής έγινε μία προσπάθεια να προσδιοριστεί αν με ακόμα λιγότερα δεδομένα εκπαίδευσης, μειώνεται περισσότερο και η αποτελεσματικότητα της ταξινόμησης. Επομένως, χρησιμοποιήθηκε το 10% των δεδομένων ελέγχου για την εκπαίδευση του ταξινομητή και το 90% για την αξιολόγησή του. Ποιοτικά, το αποτέλεσμα που προέκυψε είναι ικανοποιητικό, με εμφανείς τις αστοχίες στα ίδια σημεία με τις προηγούμενες ταξινομήσεις. Παρακάτω παρουσιάζονται κάποια ενδεικτικά αποσπάσματα της εικόνας.



Εικόνα 4.50. Επιτυχής ταξινόμηση. Αριστερά: Πολυφασματική δορυφορική εικόνα (RGB). Δεξιά: Ταξινομημένη εικόνα (πράσινο χρώμα: Αμπέλι, καφέ χρώμα: Έδαφος).



Εικόνα 4.51. Άστοχη ταξινόμηση. Αριστερά: Πολυφασματική δορυφορική εικόνα (RGB). Δεξιά: Ταξινομημένη εικόνα (πράσινο χρώμα: Αμπέλι, καφέ χρώμα: Έδαφος).

Σύμφωνα με την ποσοτική αξιολόγηση, η ταξινόμηση θεωρείται επιτυχής με Ολική Ακρίβεια ίση με 98%. Η μόνη διαφορά επήλθε στο δείκτη kappa, ο οποίος μειώθηκε στο 0,83 (από 0,85 στο προηγούμενο πείραμα). Ο Πίνακας Σύγχυσης για το παρόν πείραμα παρουσιάζεται παρακάτω.

	ΑΜΠΕΛΙ	ΕΔΑΦΟΣ	ΑΘΡΟΙΣΜΑ	P.A.
ΑΜΠΕΛΙ	145200.0	1788.0	146988.0	0.99
ΕΔΑΦΟΣ	977.0	7386.0	8363.0	0.88
ΑΘΡΟΙΣΜΑ	146177.0	9174.0	kappa:	0.83
U.A.	0.99	0.81	O.A.:	0.98

Πίνακας 4.25. Πίνακας Σύγχυσης για πείραμα με ratio = 10% στην περιοχή της Επανομής.

Η ταξινόμηση που προέκυψε για την περιοχή μελέτης της Επανομής μέσω των παραπάνω πειραμάτων παρουσιάζεται για μία υποπεριοχή της εικόνας, ώστε να είναι εμφανής ο εντοπισμός του φυλλώματος στην εικόνα.



Εικόνα 4.52. Αποτέλεσμα ταξινόμησης στην περιοχή μελέτης της Επανομής (πράσινο χρώμα: φύλλωμα).

Για τη συγκριτική αξιολόγηση των πέντε πειραμάτων για την περιοχή της Επανομής, παρουσιάζονται συγκεντρωτικά οι ποσοτικοί τους δείκτες.

	Ratio (training – validation)				
	10% - 90%	20% - 80%	30% - 70%	40% - 60%	50% - 50%
O.A.	0.98	0.98	0.99	0.99	0.99
kappa	0.83	0.85	0.87	0.87	0.88
U.A.	0.9	0.91	0.92	0.93	0.93
(average)					
P.A.	0.94	0.95	0.95	0.96	0.96
(average)					
F1-score	0.98	0.98	0.98	0.98	0.98

Πίνακας 4.26. Πίνακας Συνολικών Ποσοτικών Αποτελεσμάτων για τα πειράματα στην περιοχή της Επανομής.

Από τη συνολική ποσοτική αξιολόγηση των πειραμάτων για την περιοχή μελέτης της Επανομής προκύπτει ότι η χρήση περισσότερων δεδομένων ελέγχου για την εκπαίδευση του αλγορίθμου βελτίωσε την αποτελεσματικότητα της ταξινόμησης. Επιπλέον, η τιμή του δείκτη F1-score που ισούται με 0,99 σε όλα τα πειράματα υποδεικνύει ότι τα True Positive εικονοστοιχεία είναι πολύ περισσότερα από τα False Positive και τα False Negative. Αυτό δικαιολογείται από το πλήθος των δεδομένων ελέγχου για κάθε κατηγορία ταξινόμησης, όπου τα εικονοστοιχεία στην κατηγορία Αμπέλι είναι αριθμητικά περισσότερα από αυτά στην κατηγορία Έδαφος. Συνολικά, η ταξινόμηση θεωρείται επιτυχής στο διαχωρισμό των αμπελιών από το έδαφος.

Περιοχή Μελέτης: Καλή Βρύση

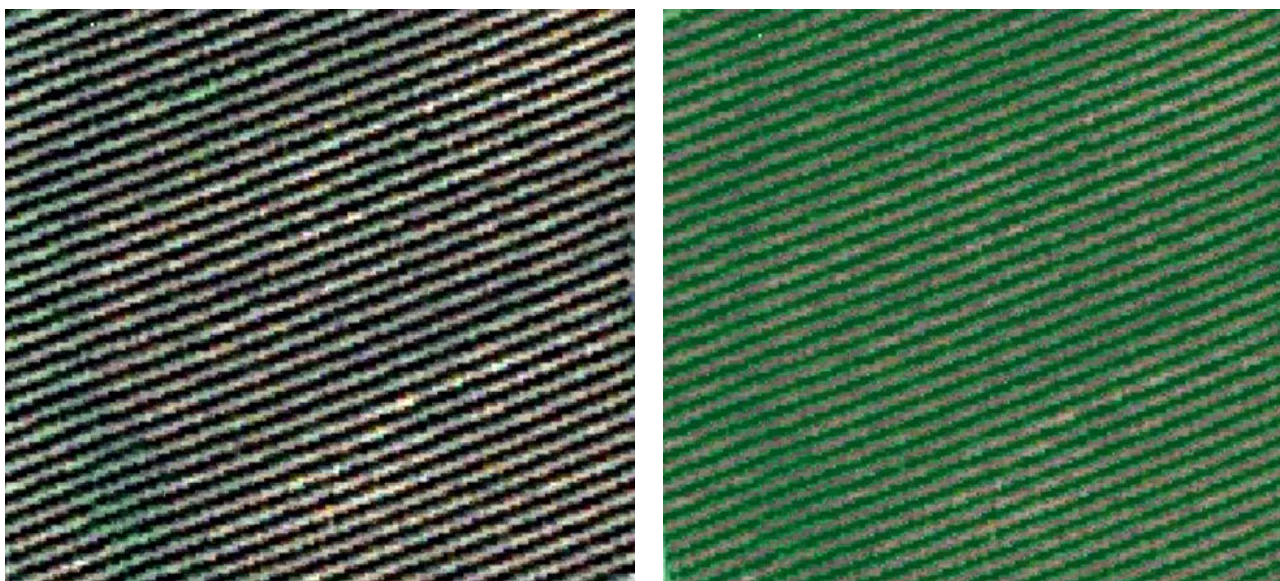
Για την περιοχή μελέτης της Καλής Βρύσης υλοποιήθηκαν έξι πειράματα, με διαφορετικά ποσοστά δεδομένων εκπαίδευσης του αλγορίθμου. Τα πειράματα ξεκίνησαν με το υψηλότερο ratio που εφαρμόστηκε και συνεχίστηκαν με κλιμακούμενη μείωση του ratio. Επίσης, υλοποιήθηκαν στο σύνολο των αμπελοτεμαχίων της περιοχής, όπως αυτά παρουσιάζονται στην παρακάτω εικόνα. Λόγω περιορισμένου χώρου, τα αποτελέσματα των πειραμάτων παρατίθενται για υποπεριοχές των αμπελοτεμαχίων, ώστε να είναι ευκρινέστερη η ταξινόμηση που προέκυψε στο εκάστοτε πείραμα.



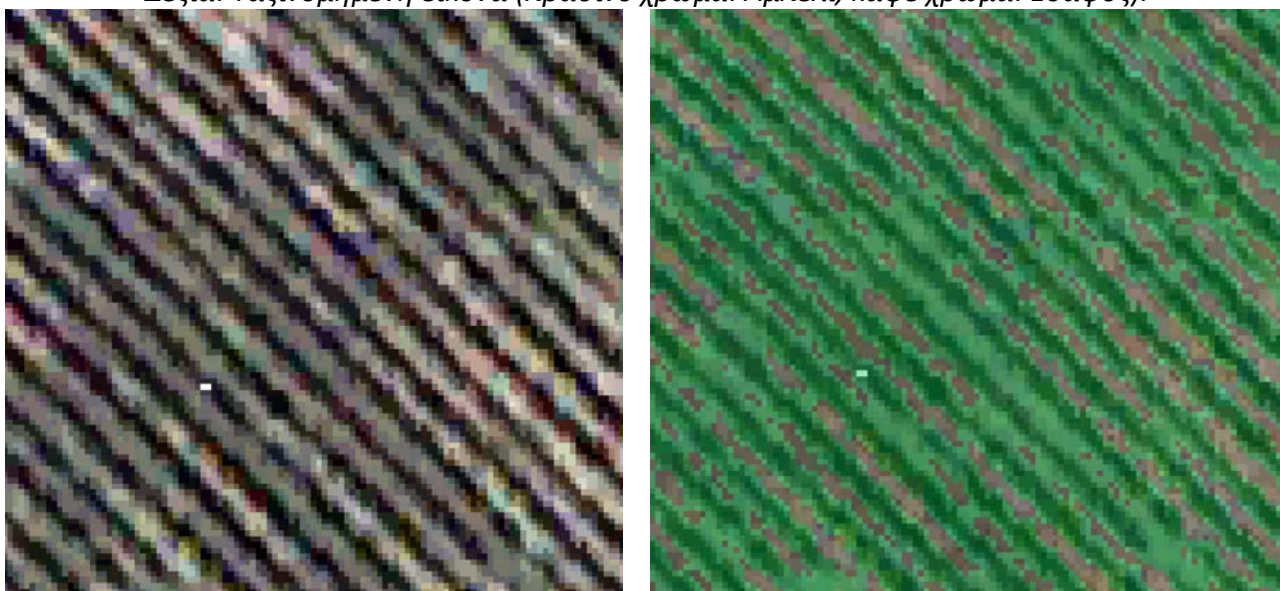
Εικόνα 4.53. Αμπελοτεμάχια περιοχής Καλής Βρύσης.

Πείραμα 1 (ratio = 50%)

Στο πρώτο πείραμα χρησιμοποιήθηκε το 50% των δεδομένων ελέγχου για την εκπαίδευση του αλγορίθμου και το υπόλοιπο 50% για την αξιολόγησή του. Το αποτέλεσμα που προέκυψε ήταν ικανοποιητικό, καθώς για το μεγαλύτερο μέρος της εικόνας τα εικονοστοιχεία αμπέλου και εδάφους ταξινομήθηκαν σωστά στις αντίστοιχες κατηγορίες. Παρακάτω παρουσιάζονται κάποια ενδεικτικά στιγμιότυπα.



Εικόνα 4.54. Επιτυχής ταξινόμηση. Αριστερά: Πολυφασματική δορυφορική εικόνα (RGB).
Δεξιά: Ταξινομημένη εικόνα (πράσινο χρώμα: Αμπέλι, καφέ χρώμα: Έδαφος).



Εικόνα 4.55. Άστοχη ταξινόμηση. Αριστερά: Πολυφασματική δορυφορική εικόνα (RGB).
Δεξιά: Ταξινομημένη εικόνα (πράσινο χρώμα: Αμπέλι, καφέ χρώμα: Έδαφος).

Υπήρξαν κάποιες αστοχίες στην ταξινόμηση των εικονοστοιχείων του εδάφους, σε σημεία όπου το έδαφος ανάμεσα από τα αμπέλια καλύπτεται με αυτοφυή βλάστηση και τα αμπέλια είναι απεριποίητα. Σε αυτές τι περιπτώσεις οι φασματικές υπογραφές του αμπελιού και του εδάφους μοιάζουν και για αυτό το λόγο τα εικονοστοιχεία του εδάφους ταξινομήθηκαν στην κατηγορία Αμπέλι.

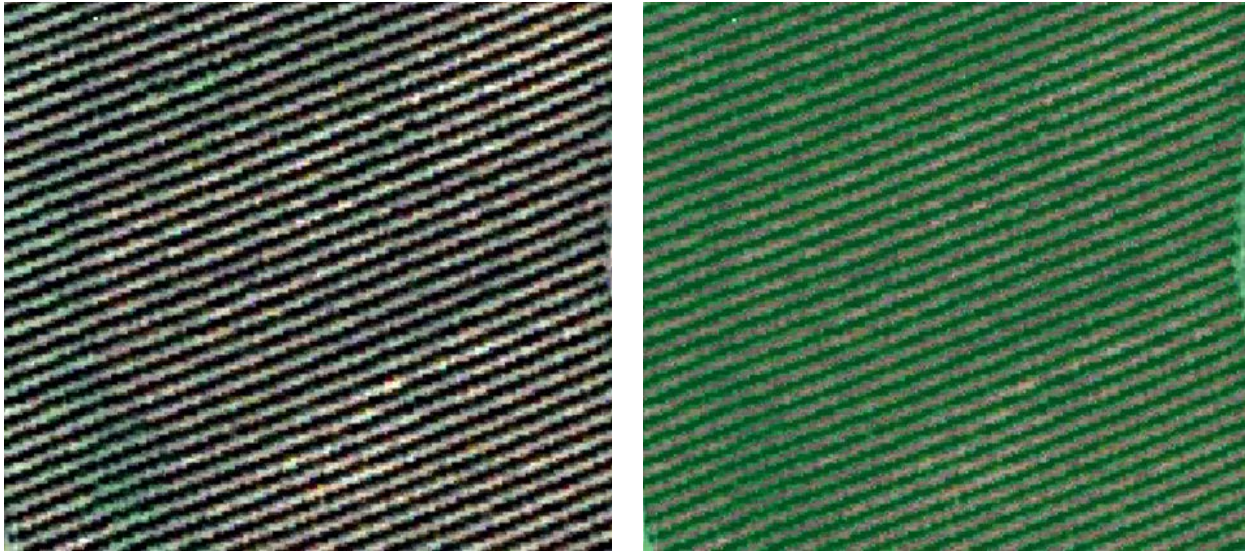
Από την ποσοτική αξιολόγηση προκύπτει ότι η ταξινόμηση είναι επιτυχής, με την Ολική Ακρίβεια να ανέρχεται σε 99% και το kappa να ισούται με 0,95. Επιπλέον, τα εικονοστοιχεία που ταξινομήθηκαν σε διαφορετική κατηγορία από αυτή που πραγματικά ανήκουν (False Positives, False Negatives) είναι πολύ λιγότερα σε πλήθος από αυτά που ταξινομήθηκαν σωστά.

	ΑΜΠΕΛΙ	ΕΔΑΦΟΣ	ΑΘΡΟΙΣΜΑ	P.A.
ΑΜΠΕΛΙ	102059.0	120.0	102179.0	0.99
ΕΔΑΦΟΣ	83.0	1965.0	2048.0	0.96
ΑΘΡΟΙΣΜΑ	102142.0	2085.0	κappa:	0.95
U.A.	0.99	0.94	O.A.:	0.99

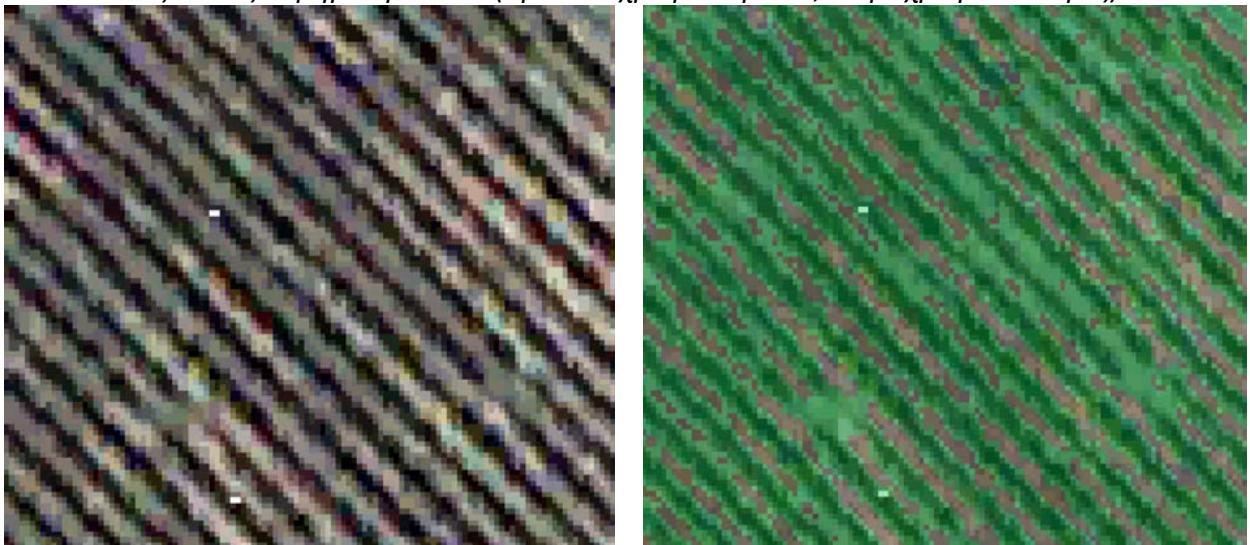
Πίνακας 4.27. Πίνακας Σύγχυσης για πείραμα με ratio = 50% στην περιοχή της Καλής Βρύσης.

Πείραμα 2 (ratio = 40%)

Στο δεύτερο πείραμα το ποσοστό δεδομένων εκπαίδευσης μειώθηκε στο 40% για να εκτιμηθεί η αποτελεσματικότητα του ταξινομητή και με το 60% των δεδομένων ελέγχου έγινε η αξιολόγησή του. Η ταξινόμηση θεωρείται επιτυχής για τις δύο κατηγορίες, με κάποιες αστοχίες που υπήρχαν και στην προηγούμενη ταξινόμηση. Παρακάτω παρουσιάζονται κάποια ενδεικτικά αποτελέσματα.



Εικόνα 4.56. Επιτυχής ταξινόμηση. Αριστερά: Πολυφασματική δορυφορική εικόνα (RGB). Δεξιά: Ταξινομημένη εικόνα (πράσινο χρώμα: Αμπέλι, καφέ χρώμα: Έδαφος).



Εικόνα 4.57. Άστοχη ταξινόμηση. Αριστερά: Πολυφασματική δορυφορική εικόνα (RGB). Δεξιά: Ταξινομημένη εικόνα (πράσινο χρώμα: Αμπέλι, καφέ χρώμα: Έδαφος).

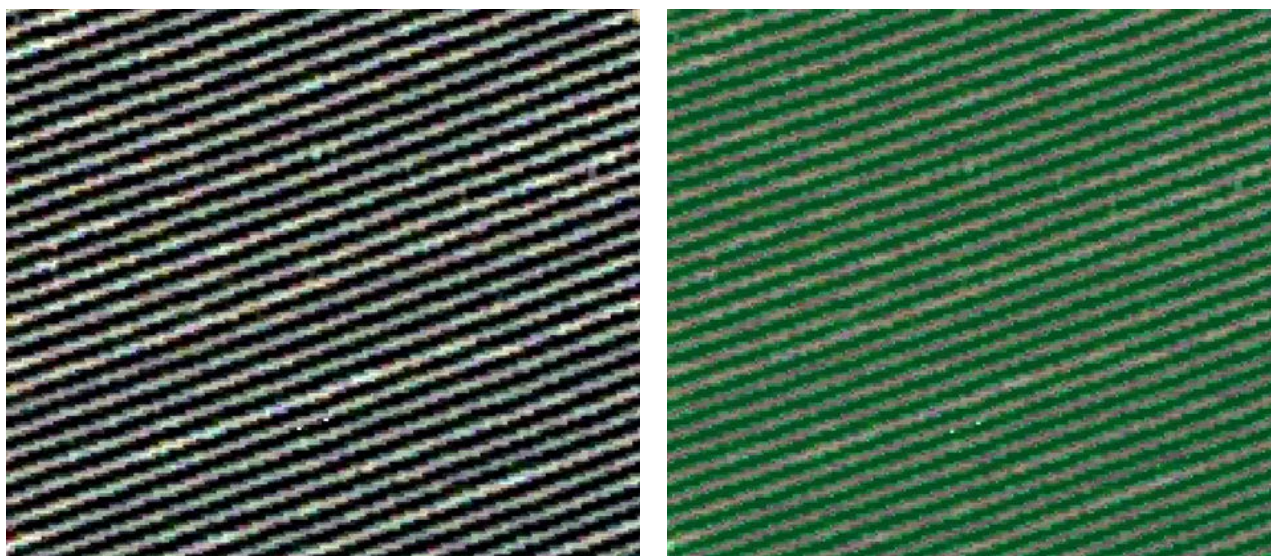
Από την ποσοτική αξιολόγηση προκύπτει ότι η ταξινόμηση είναι εξίσου αποτελεσματική με την προηγούμενη, καθώς παρ' όλο που μειώθηκε το ποσοστό δεδομένων εκπαίδευσης η Ολική Ακρίβεια και ο δείκτης kappa δε μειώθηκαν. Παρακάτω παρατίθενται τα ποσοτικά αποτελέσματα της ταξινόμησης.

	ΑΜΠΕΛΙ	ΕΔΑΦΟΣ	ΑΘΡΟΙΣΜΑ	P.A.
ΑΜΠΕΛΙ	122453.0	130.0	122583.0	0.99
ΕΔΑΦΟΣ	117.0	2372.0	2489.0	0.95
ΑΘΡΟΙΣΜΑ	122570.0	2502.0	kappa:	0.95
U.A.	0.99	0.95	O.A.:	0.99

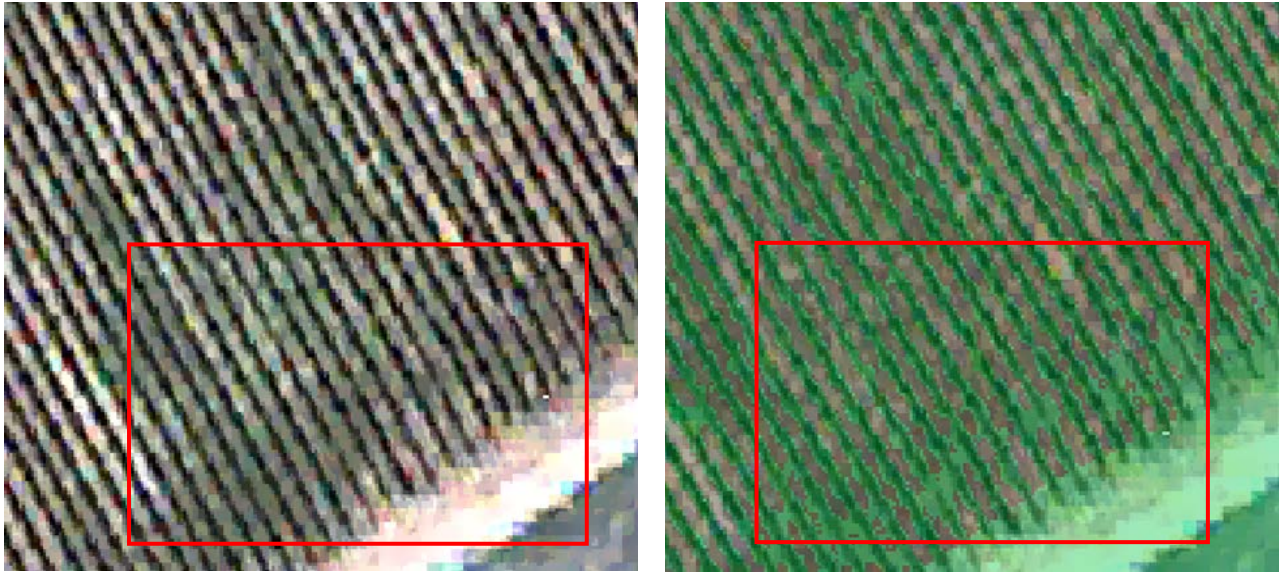
Πίνακας 4.28. Πίνακας Σύγχυσης για πείραμα με ratio = 40% στην περιοχή της Καλής Βρύσης.

Πείραμα 3 (ratio = 30%)

Στο τρίτο πείραμα χρησιμοποιήθηκε το 30% των δεδομένων ελέγχου για την εκπαίδευση του ταξινομητή και το 70% των δεδομένων για την αξιολόγησή του. Η ταξινόμηση ήταν επιτυχής, με κάποιες αστοχίες στην ταξινόμηση των εικονοστοιχείων του εδάφους στα σημεία με ενδιαμέση των αμπελιών βλάστηση. Παρακάτω παρουσιάζονται κάποια χαρακτηριστικά στιγμιότυπα.



Εικόνα 4.58. Επιτυχής ταξινόμηση. Αριστερά: Πολυφασματική δορυφορική εικόνα (RGB). Δεξιά: Ταξινομημένη εικόνα (πράσινο χρώμα: Αμπέλι, καφέ χρώμα: Έδαφος).



Εικόνα 4.59. Άστοχη ταξινόμηση. Αριστερά: Πολυφασματική δορυφορική εικόνα (RGB). Δεξιά: Ταξινομημένη εικόνα (πράσινο χρώμα: Αμπέλι, καφέ χρώμα: Έδαφος).

Όπως φαίνεται και στην Εικόνα 4.50, η αστοχία της ταξινόμησης εντοπίστηκε και πάλι σε σημεία όπου το έδαφος καλύπτεται με αυτοφυή βλάστηση, με αποτέλεσμα η φασματική του υπογραφή να μπερδεύεται με αυτή του αμπελιού και το έδαφος να ταξινομείται στην κατηγορία Αμπέλι.

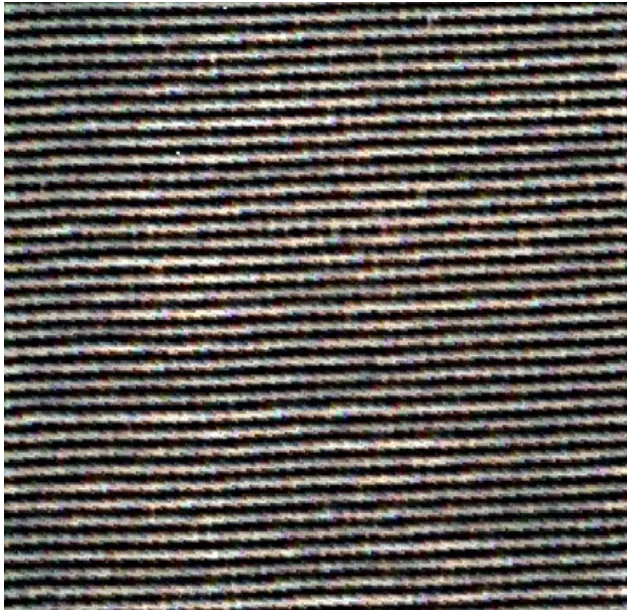
Η ποσοτική αξιολόγηση καταδεικνύει την αποτελεσματικότητα της ταξινόμησης, καθώς η Ολική Ακρίβεια ανέρχεται στο 99% (όμοια με τα προηγούμενα πειράματα). Μικρή μεταβολή επήλθε στο δείκτη kappa, ο οποίος μειώθηκε κατά 0,01 σε σχέση με τα προηγούμενα πειράματα ($kappa_{50\%} = 0,95$, $kappa_{40\%} = 0,95$, $kappa_{30\%} = 0,94$). Παρακάτω παρατίθενται οι ποσοτικοί δείκτες αξιολόγησης της ταξινόμησης.

	ΑΜΠΕΛΙ	ΕΔΑΦΟΣ	ΑΘΡΟΙΣΜΑ	P.A.
ΑΜΠΕΛΙ	142883.0	196.0	143079.0	0.99
ΕΔΑΦΟΣ	116.0	2723.0	2839.0	0.96
ΑΘΡΟΙΣΜΑ	142999.0	2919.0	kappa:	0.94
U.A.	0.99	0.93	O.A.:	0.99

Πίνακας 4.29. Πίνακας Σύγχυσης για πείραμα με ratio = 30% στην περιοχή της Καλής Βρύσης.

Πείραμα 4 (ratio = 20%)

Στο τέταρτο πείραμα χρησιμοποιήθηκε το 20% των δεδομένων ελέγχου για την εκπαίδευση του αλγορίθμου και το 80% για την αξιολόγησή του. Από την ποιοτική αξιολόγηση προκύπτει ότι η ταξινόμηση είναι επιτυχής, με μόνες αστοχίες αυτές που υπήρχαν και στα προηγούμενα πειράματα. Χαρακτηριστικά στιγμιότυπα της ταξινόμησης παρουσιάζονται παρακάτω.



Εικόνα 4.60. Επιτυχής ταξινόμηση. Αριστερά: Πολυφασματική δορυφορική εικόνα (RGB). Δεξιά: Ταξινομημένη εικόνα (πράσινο χρώμα: Αμπέλι, καφέ χρώμα: Έδαφος).



Εικόνα 4.61. Άστοχη ταξινόμηση. Αριστερά: Πολυφασματική δορυφορική εικόνα (RGB). Δεξιά: Ταξινομημένη εικόνα (πράσινο χρώμα: Αμπέλι, καφέ χρώμα: Έδαφος).

Οι αστοχίες της ταξινόμησης διατηρούνται και σε αυτό το πείραμα καθώς οφείλονται στη φασματική συμπεριφορά των εικονοστοιχείων του εδάφους και επομένως αφορούν στα πρωτογενή δεδομένα και όχι στην αποτελεσματικότητα του ταξινομητή.

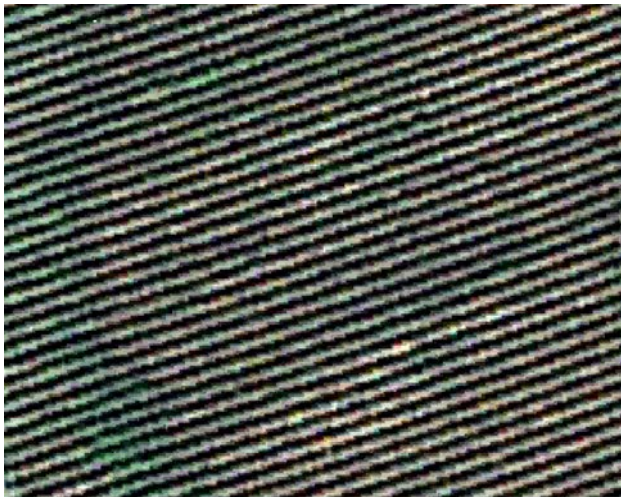
Τα ποσοτικά μέτρα αξιολόγησης δε μεταβλήθηκαν σε σχέση με το προηγούμενο πείραμα (όπου ratio = 30%), καθώς η Ολική Ακρίβεια και ο δείκτης kappa φέρουν τις ίδιες τιμές. Ο Πίνακας Σύγχυσης για το παρόν πείραμα παρατίθεται παρακάτω.

	ΑΜΠΕΛΙ	ΕΔΑΦΟΣ	ΑΘΡΟΙΣΜΑ	P.A.
ΑΜΠΕΛΙ	163222.0	211.0	163433.0	0.99
ΕΔΑΦΟΣ	205.0	3125.0	3330.0	0.94
ΑΘΡΟΙΣΜΑ	163427.0	3336.0	κappa:	0.94
U.A.	0.99	0.94	O.A.:	0.99

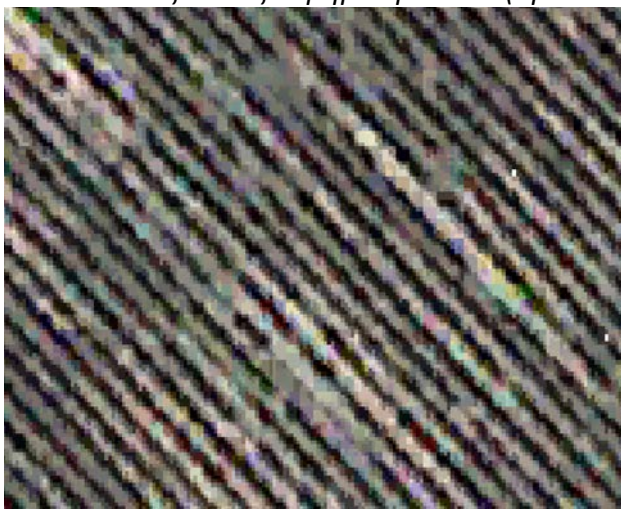
Πίνακας 4.30. Πίνακας Σύγχυσης για πείραμα με ratio = 20% στην περιοχή της Καλής Βρύσης.

Πείραμα 5 (ratio = 10%)

Για την αξιολόγηση της αποτελεσματικότητας του αλγορίθμου, επιλέχθηκε να χρησιμοποιηθούν για την εκπαίδευση ακόμα λιγότερα δεδομένα ελέγχου και συγκεκριμένα το 10% και με το υπόλοιπο 90% των δεδομένων έγινε η αξιολόγησή του. Η ταξινόμηση ήταν εξίσου επιτυχής με τις προηγούμενες, διατηρώντας τις ίδιες αστοχίες σε εντοπισμένα σημεία με παραπλήσια φασματική συμπεριφορά αμπελιού-εδάφους. Κάποια ενδεικτικά αποσπάσματα της ταξινόμησης παρουσιάζονται παρακάτω.



Εικόνα 4.62. Επιτυχής ταξινόμηση. Αριστερά: Πολυφασματική δορυφορική εικόνα (RGB). Δεξιά: Ταξινομημένη εικόνα (πράσινο χρώμα: Αμπέλι, καφέ χρώμα: Έδαφος).



Εικόνα 4.63. Άστοχη ταξινόμηση. Αριστερά: Πολυφασματική δορυφορική εικόνα (RGB). Δεξιά: Ταξινομημένη εικόνα (πράσινο χρώμα: Αμπέλι, καφέ χρώμα: Έδαφος).

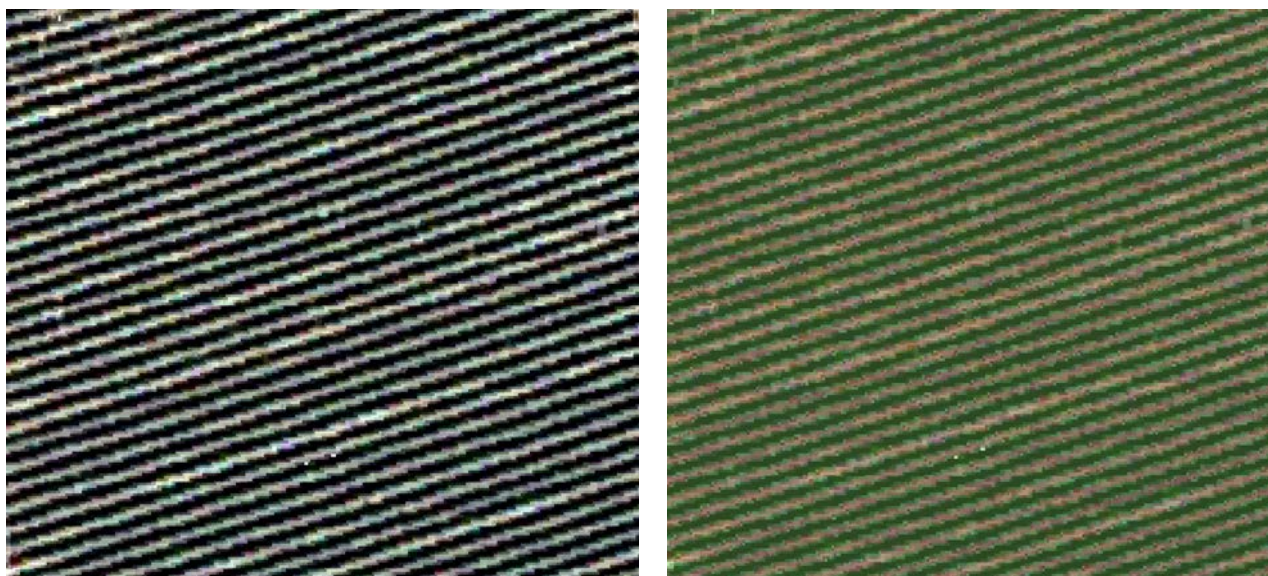
Σύμφωνα με την ποσοτική αξιολόγηση, η ταξινόμηση θεωρείται επιτυχής με τη Ολική Ακρίβεια να ανέρχεται στο 99% και το δείκτη kappa στο 0,94. Συγκρίνοντας αυτά τα μεγέθη με τα αντίστοιχα των προηγούμενων δύο πειραμάτων, δεν υπάρχει καμία μεταβολή. Επομένως, ο ταξινομητής παρουσιάζει μία σταθερότητα και δεν επηρεάζεται από τη μείωση του ποσοστού των δεδομένων εκπαίδευσης που χρησιμοποιείται.

	ΑΜΠΕΛΙ	ΕΔΑΦΟΣ	ΑΘΡΟΙΣΜΑ	P.A.
ΑΜΠΕΛΙ	183669.0	252.0	183921.0	0.99
ΕΔΑΦΟΣ	186.0	3501.0	3687.0	0.95
ΑΘΡΟΙΣΜΑ	183855.0	3753.0	kappa:	0.94
U.A.	0.99	0.93	O.A.:	0.99

Πίνακας 4.31. Πίνακας Σύγχυσης για πείραμα με ratio = 10% στην περιοχή της Καλής Βρύσης.

Πείραμα 6 (ratio = 5%)

Στο τελευταίο πείραμα για την περιοχή μελέτης της Καλής Βρύσης χρησιμοποιήθηκε ακόμα μικρότερο ποσοστό δεδομένων για την εκπαίδευση του αλγορίθμου, καθώς όπως διαπιστώθηκε παραπάνω τα πειράματα με ratio 10%, 20% και 30% παρουσίασαν σταθερή ακρίβεια. Επομένως, για να διαπιστωθεί αν θα υπάρξει μεταβολή της αποτελεσματικότητας του αλγορίθμου, χρησιμοποιήθηκε μόλις το 5% των δεδομένων ελέγχου για εκπαίδευση και το 95% για αξιολόγηση του ταξινομητή.



Εικόνα 4.64. Επιτυχής ταξινόμηση. Αριστερά: Πολυφασματική δορυφορική εικόνα (RGB). Δεξιά: Ταξινομημένη εικόνα (πράσινο χρώμα: Αμπέλι, καφέ χρώμα: Έδαφος).



Εικόνα 4.65. Άστοχη ταξινόμηση. Αριστερά: Πολυφασματική δορυφορική εικόνα (RGB). Δεξιά: Ταξινομημένη εικόνα (πράσινο χρώμα: Αμπέλι, καφέ χρώμα: Έδαφος).

Η ταξινόμηση που προέκυψε για την περιοχή μελέτης της Καλής Βρύσης μέσω των παραπάνω πειραμάτων παρουσιάζεται για μία υποπεριοχή της εικόνας, ώστε να είναι εμφανής ο εντοπισμός του φυλλώματος στην εικόνα.



Εικόνα 4.66. Αποτέλεσμα ταξινόμησης στην περιοχή μελέτης της Καλής Βρύσης (πράσινο χρώμα: φύλλωμα).

Από την ποσοτική αξιολόγηση προκύπτει ότι η Ολική Ακρίβεια της ταξινόμησης δε μεταβάλλεται και μόνο ο δείκτης kappa παρουσιάζει μία πτώση ($kappa_{10\%} = 0,94$, $kappa_{5\%} = 0,93$). Ο Πίνακας Σύγχυσης της ταξινόμησης παρουσιάζεται παρακάτω.

	ΑΜΠΕΛΙ	ΕΔΑΦΟΣ	ΑΘΡΟΙΣΜΑ	P.A.
ΑΜΠΕΛΙ	193864.0	306.0	194170.0	0.99
ΕΔΑΦΟΣ	205.0	3656.0	3861.0	0.95
ΑΘΡΟΙΣΜΑ	194069.0	3962.0	kappa:	0.93
U.A.	0.99	0.92	O.A.:	0.99

Πίνακας 4.32. Πίνακας Σύγχυσης για πείραμα με ratio = 5% στην περιοχή της Καλής Βρύσης.

Για τη συγκριτική αξιολόγηση των έξι πειραμάτων στην περιοχή μελέτης της Καλής Βρύσης, παρουσιάζονται οι ποσοτικοί τους δείκτες στον παρακάτω πίνακα.

	Ratio (training – validation)					
	5% - 95%	10% - 90%	20% - 80%	30% - 70%	40% - 60%	50% - 50%
O.A.	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99
kappa	0.93	0.94	0.94	0.94	0.95	0.95
U.A. (average)	0.96	0.96	0.97	0.96	0.98	0.97
P.A. (average)	0.98	0.98	0.97	0.98	0.98	0.98
F1-score	0.98	0.98	0.98	0.98	0.98	0.98

Πίνακας 4.33. Πίνακας Συνολικών Ποσοτικών Αποτελεσμάτων για τα πειράματα στην περιοχή της Καλής Βρύσης.

Από τα συγκριτικά αποτελέσματα προκύπτει το εξής συμπέρασμα: η Ολική Ακρίβεια της ταξινόμησης δεν επηρεάζεται από το ποσοστό των δεδομένων ελέγχου που χρησιμοποιούνται για την εκπαίδευση του αλγορίθμου. Το μόνο μέγεθος που επηρεάζεται από αυτή τη μεταβολή είναι ο δείκτης kappa και αυτό είναι αναμενόμενο, καθώς ο δείκτης λαμβάνει υπόψη τις πιθανότητες τυχαίας κατηγοριοποίησης των ορθά ταξινομημένων εικονοστοιχείων στις κλάσεις τους και αφού τις συγκρίνει με την πραγματική ταξινόμηση, εκφράζει το ποσοστό των σφαλμάτων που απέφυγε η πραγματική ταξινόμηση. Δηλαδή όσο μεγαλύτερη ήταν η εκπαίδευση του αλγορίθμου, τόσο περισσότερα σφάλματα αποφεύχθηκαν. Συνολικά, η ταξινόμηση της εικόνας της Καλής Βρύσης κρίνεται επιτυχής με βάση την ποσοτική αξιολόγηση.

Περιοχή Μελέτης: Μαντινεία

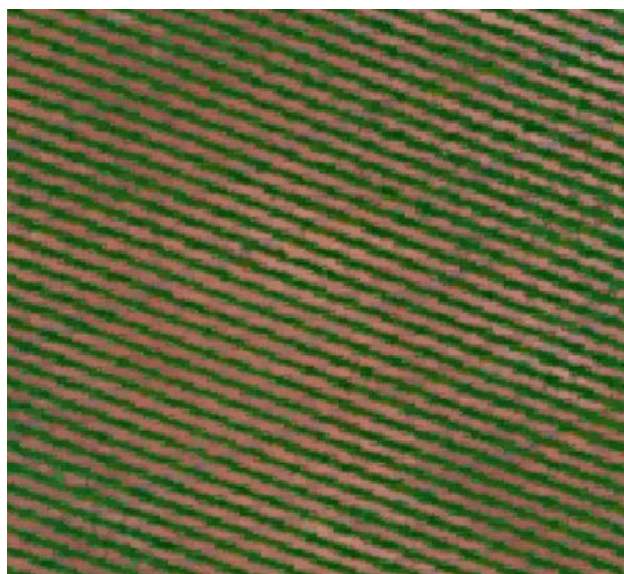
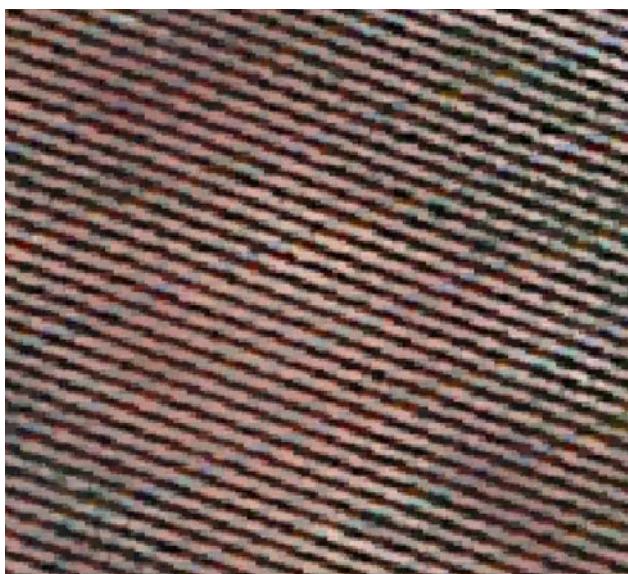
Για την περιοχή μελέτης της Μαντινείας υλοποιήθηκαν συνολικά έξι πειράματα, με διαφορετικά ποσοστά δεδομένων ελέγχου, ξεκινώντας από το μεγαλύτερο ποσοστό και καταλήγοντας στο μικρότερο. Στόχος ήταν η αξιολόγηση της αποτελεσματικότητας του αλγορίθμου με διαφορετικά ratio. Τα πειράματα υλοποιήθηκαν στο σύνολο των αμπελοτεμαχίων της περιοχής, όπως αυτά παρουσιάζονται στην παρακάτω εικόνα. Λόγω περιορισμένου χώρου, τα αποτελέσματα των πειραμάτων παρατίθενται για υποπεριοχές των αμπελοτεμαχίων, ώστε να είναι ευκρινέστερη η ταξινόμηση που προέκυψε στο εκάστοτε πείραμα.



Εικόνα 4.67. Αμπελοτεμάχια περιοχής Μαντινείας.

Πείραμα 1 (ratio = 50%)

Στο πρώτο πείραμα χρησιμοποιήθηκε το 50% των δεδομένων ελέγχου για την εκπαίδευση του ταξινομητή και το υπόλοιπο 50% για την αξιολόγησή του. Ποιοτικά η ταξινόμηση κρίνεται επιτυχής, καθώς στο μεγαλύτερο μέρος της εικόνας τα εικονοστοιχεία του αμπελιού και του εδάφους ταξινομήθηκαν στις αντίστοιχες κατηγορίες. Παρακάτω παρουσιάζονται κάποια ενδεικτικά στιγμιότυπα.



Εικόνα 4.68. Επιτυχής ταξινόμηση. Αριστερά: Πολυφασματική δορυφορική εικόνα (RGB). Δεξιά: Ταξινομημένη εικόνα (πράσινο χρώμα: Αμπέλι, καφέ χρώμα: Έδαφος).



Εικόνα 4.69. Άστοχη ταξινόμηση. Αριστερά: Πολυφασματική δορυφορική εικόνα (RGB). Δεξιά: Ταξινομημένη εικόνα (πράσινο χρώμα: Αμπέλι, καφέ χρώμα: Έδαφος).

Όπως φαίνεται και στην Εικόνα 4.58, προέκυψαν κάποιες αστοχίες στην ταξινόμηση σε σημεία όπου η ανάπτυξη των πρέμνων είναι ελλιπής και η φασματική τους υπογραφή είναι παρόμοια με αυτή του εδάφους. Για το λόγο αυτό, κάποια εικονοστοιχεία που στην πραγματικότητα ανήκουν στην κατηγορία Έδαφος, ταξινομήθηκαν λανθασμένα στην κατηγορία Αμπέλι.

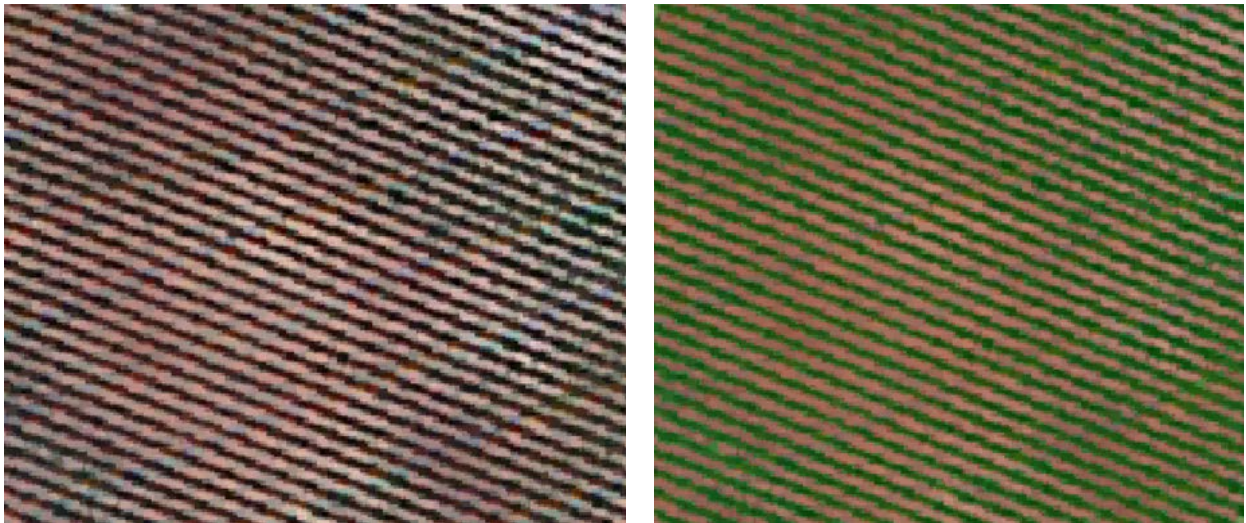
Τα ποσοτικά μέτρα αξιολόγησης καταδεικνύουν μία πολύ αποτελεσματική ταξινόμηση, καθώς η Ολική Ακρίβεια φτάνει το 99% και ο δείκτης kappa ισούται με 0,99. Επιπλέον, τα εικονοστοιχεία που ταξινομήθηκαν σε λάθος κατηγορία (False Positive, False Negative) είναι σημαντικά λιγότερα από τα εικονοστοιχεία που ταξινομήθηκαν σωστά (True Positives, True Negatives). Παρακάτω παρατίθεται ο Πίνακας Σύγχυσης της ταξινόμησης.

	ΑΜΠΕΛΙ	ΕΔΑΦΟΣ	ΑΘΡΟΙΣΜΑ	P.A.
ΑΜΠΕΛΙ	60077.0	58.0	60135.0	0.99
ΕΔΑΦΟΣ	42.0	8218.0	8260.0	0.99
ΑΘΡΟΙΣΜΑ	60119.0	8276.0	κappa:	0.99
U.A.	0.99	0.99	O.A.:	0.99

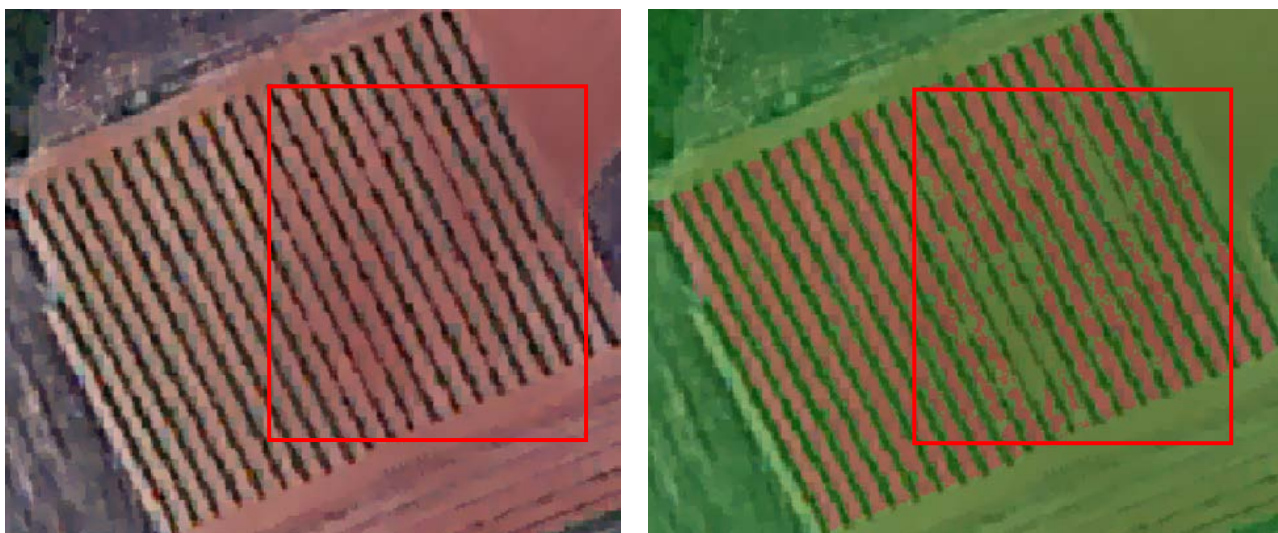
Πίνακας 4.34. Πίνακας Σύγχυσης για πείραμα με ratio = 50% στην περιοχή της Μαντινείας.

Πείραμα 2 (ratio = 40%)

Στο δεύτερο πείραμα χρησιμοποιήθηκε το 40% των δεδομένων ελέγχου για την εκπαίδευση του αλγορίθμου και το 60% για την αξιολόγησή του, ώστε να διαπιστωθεί η μεταβολή της ταξινόμησης. Τα αποτελέσματα της ταξινόμησης ήταν εξίσου ικανοποιητικά με τις αστοχίες να έχουν περιορισθεί χωρικά. Παρακάτω παρουσιάζονται τα ίδια παραδείγματα με το Πείραμα 1, ώστε να προκύψει η σύγκριση.



Εικόνα 4.70. Επιτυχής ταξινόμηση. Αριστερά: Πολυφασματική δορυφορική εικόνα (RGB). Δεξιά: Ταξινομημένη εικόνα (πράσινο χρώμα: Αμπέλι, καφέ χρώμα: Έδαφος).



Εικόνα 4.71. Άστοχη ταξινόμηση. Αριστερά: Πολυφασματική δορυφορική εικόνα (RGB). Δεξιά: Ταξινομημένη εικόνα (πράσινο χρώμα: Αμπέλι, καφέ χρώμα: Έδαφος).

Στην Εικόνα 4.60 παρουσιάζεται η ίδια περιοχή με την εικόνα 4.58 (Πείραμα 1), όπου η ταξινόμηση αστόχησε. Είναι εμφανές ότι όταν ο αλγόριθμος εκπαιδεύτηκε με 40% των δεδομένων ελέγχου, προέκυψε καλύτερο αποτέλεσμα ταξινόμησης σε σχέση με την εκπαίδευση με 50%, δηλαδή λιγότερα εικονοστοιχεία εδάφους ταξινομήθηκαν στην κατηγορία Αμπέλι. Αυτή η μεταβολή πιθανότατα οφείλεται στο τυχαίο δείγμα που επιλέχθηκε για την εκπαίδευση, το οποίο στο δεύτερο πείραμα ήταν πιο αντιπροσωπευτικό.

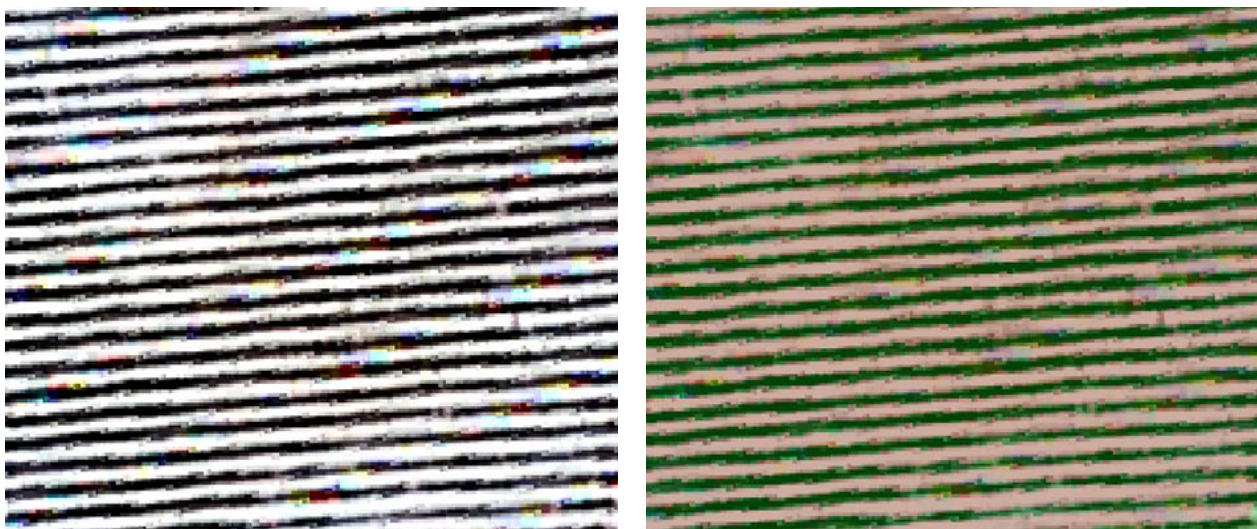
Τα ποσοτικά μέτρα αξιολόγησης του πειράματος καταδεικνύουν την αποτελεσματικότητα της ταξινόμησης, με την Ολική Ακρίβεια να φτάνει το 99%. Παρακάτω παρατίθεται ο Πίνακας Σύγχυσης του πειράματος.

	ΑΜΠΕΛΙ	ΕΔΑΦΟΣ	ΑΘΡΟΙΣΜΑ	P.A.
ΑΜΠΕΛΙ	72057.0	77.0	72134.0	0.99
ΕΔΑΦΟΣ	86.0	9854.0	9940.0	0.99
ΑΘΡΟΙΣΜΑ	72143.0	9931.0	kappa:	0.99
U.A.	0.99	0.99	O.A.:	0.99

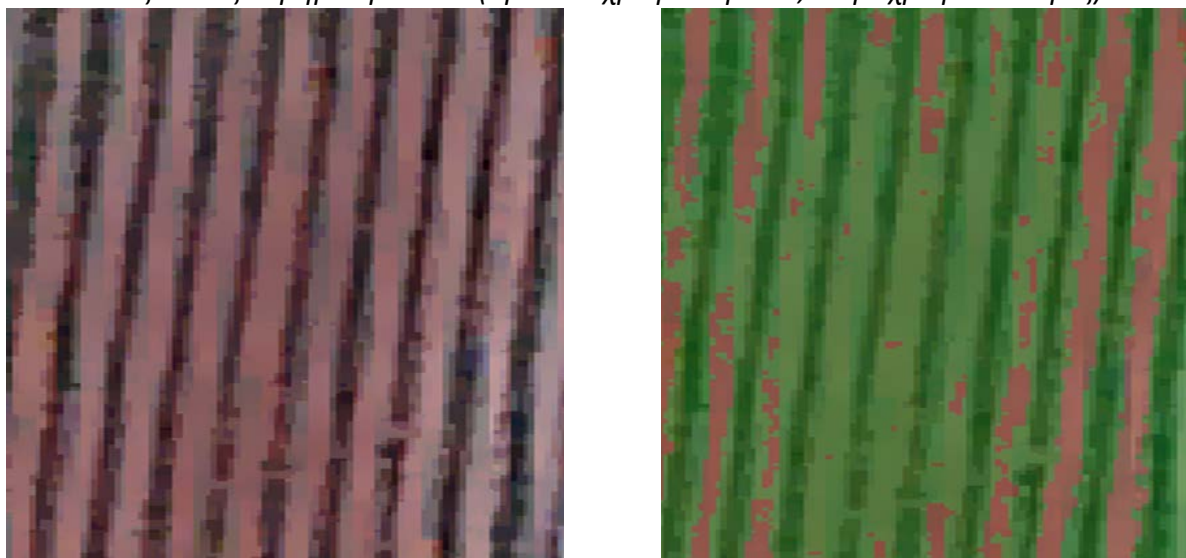
Πίνακας 4.35. Πίνακας Σύγχυσης για πείραμα με ratio = 40% στην περιοχή της Μαντινείας.

Πείραμα 3 (ratio = 30%)

Στο τρίτο πείραμα ο αλγόριθμος εκπαιδεύτηκε με το 30% των δεδομένων ελέγχου και το 70% αυτών χρησιμοποιήθηκε για την αξιολόγησή του. Ποιοτικά το αποτέλεσμα κρίνεται ικανοποιητικό για το μεγαλύτερο μέρος της εικόνας. Παρακάτω παρατίθενται κάποια χαρακτηριστικά αποσπάσματα της ταξινόμησης.



Εικόνα 4.72. Επιτυχής ταξινόμηση. Αριστερά: Πολυφασματική δορυφορική εικόνα (RGB). Δεξιά: Ταξινομημένη εικόνα (πράσινο χρώμα: Αμπέλι, καφέ χρώμα: Έδαφος).



Εικόνα 4.73. Άστοχη ταξινόμηση. Αριστερά: Πολυφασματική δορυφορική εικόνα (RGB). Δεξιά: Ταξινομημένη εικόνα (πράσινο χρώμα: Αμπέλι, καφέ χρώμα: Έδαφος).

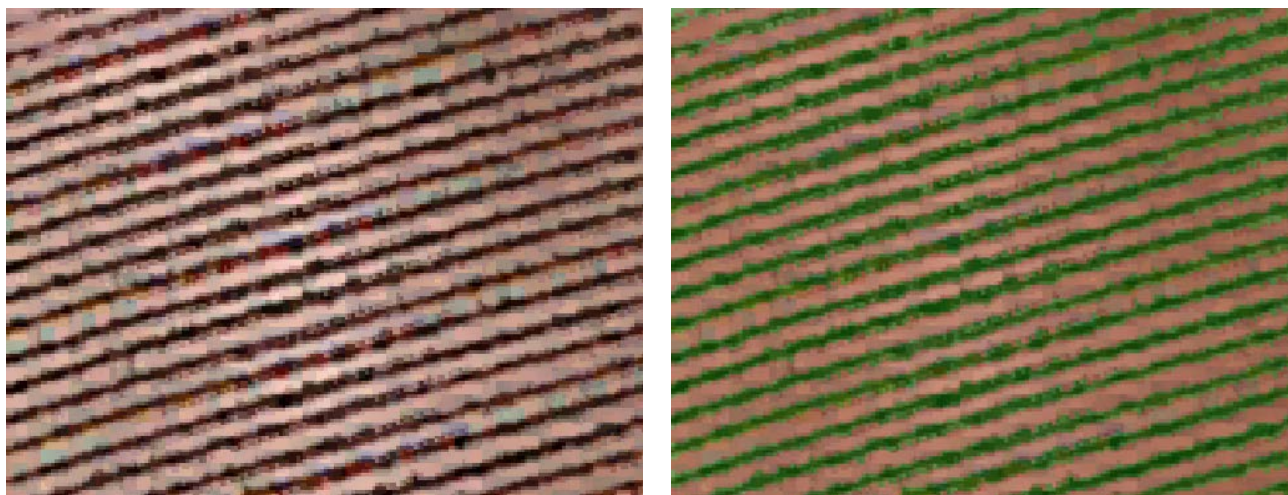
Και στην προκείμενη περίπτωση οι αστοχίες που προέκυψαν οφείλονται στην ελλιπή ανάπτυξη των αμπελιών σε ορισμένα αμπελοτεμάχια. Παρακάτω παρουσιάζεται ο Πίνακας Σύγχυσης της ταξινόμησης, κατά τον οποίο η Ολική Ακρίβεια φτάνει και πάλι το 99%, παρά το γεγονός ότι χρησιμοποιήθηκαν λιγότερα δεδομένα εκπαίδευσης του αλγορίθμου.

	ΑΜΠΕΛΙ	ΕΔΑΦΟΣ	ΑΘΡΟΙΣΜΑ	P.A.
ΑΜΠΕΛΙ	84079.0	73.0	84152.0	0.99
ΕΔΑΦΟΣ	88.0	11513.0	11601.0	0.99
ΑΘΡΟΙΣΜΑ	84167.0	11586.0	κappa:	0.99
U.A.	0.99	0.99	O.A.:	0.99

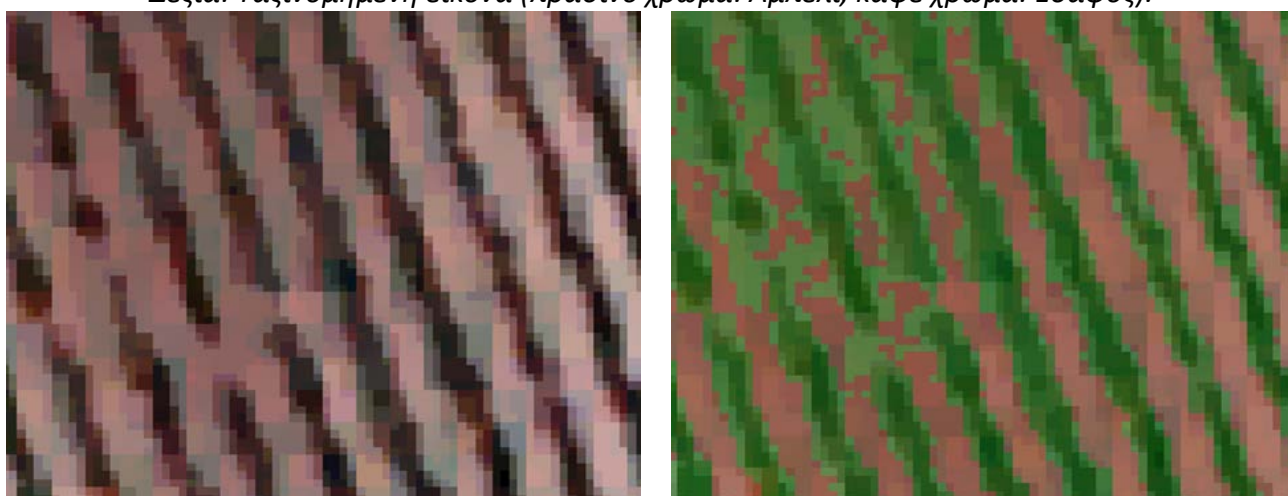
Πίνακας 4.36. Πίνακας Σύγχυσης για πείραμα με ratio = 30% στην περιοχή της Μαντινείας.

Πείραμα 4 (ratio = 20%)

Στο τέταρτο πείραμα χρησιμοποιήθηκε το 20% των δεδομένων ελέγχου για την εκπαίδευση του αλγορίθμου και το 80% για την αξιολόγησή του. Το αποτέλεσμα της ταξινόμησης ήταν ικανοποιητικό, σύμφωνα με την ποιοτική αξιολόγηση, με περιορισμένες αστοχίες όπως και στα προηγούμενα πειράματα.



Εικόνα 4.74. Επιτυχής ταξινόμηση. Αριστερά: Πολυφασματική δορυφορική εικόνα (RGB). Δεξιά: Ταξινομημένη εικόνα (πράσινο χρώμα: Αμπέλι, καφέ χρώμα: Έδαφος).



Εικόνα 4.75. Άστοχη ταξινόμηση. Αριστερά: Πολυφασματική δορυφορική εικόνα (RGB). Δεξιά: Ταξινομημένη εικόνα (πράσινο χρώμα: Αμπέλι, καφέ χρώμα: Έδαφος).

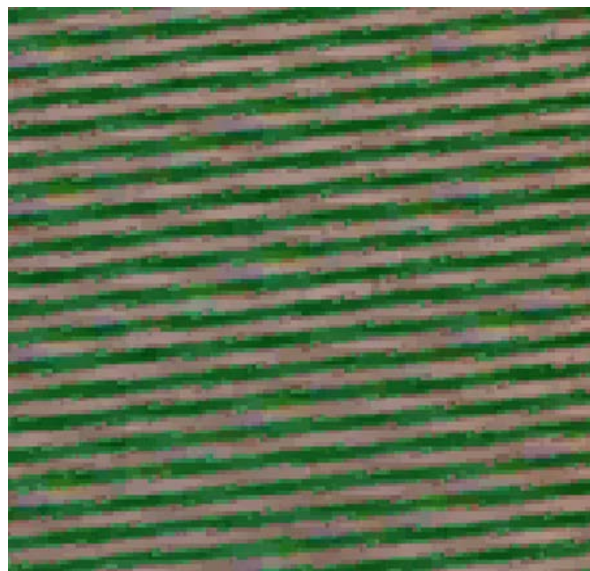
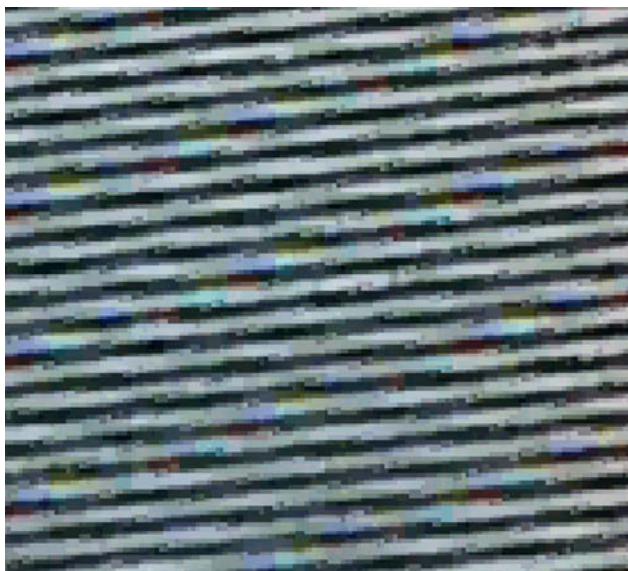
Η ποσοτική αξιολόγηση ήταν εξίσου ικανοποιητική με τις προηγούμενες, χωρίς μεταβολές στα ποσοτικά μέτρα αξιολόγησης (Ολική Ακρίβεια, kappa).

	ΑΜΠΕΛΙ	ΕΔΑΦΟΣ	ΑΘΡΟΙΣΜΑ	P.A.
ΑΜΠΕΛΙ	96087.0	125.0	96212.0	0.99
ΕΔΑΦΟΣ	104.0	13116.0	13220.0	0.99
ΑΘΡΟΙΣΜΑ	96191.0	13241.0	kappa:	0.99
U.A.	0.99	0.99	O.A.:	0.99

Πίνακας 4.37. Πίνακας Σύγχυσης για πείραμα με ratio = 20% στην περιοχή της Μαντινείας.

Πείραμα 5 (ratio = 10%)

Στο πέμπτο πείραμα χρησιμοποιήθηκε ακόμα μικρότερο σύνολο δεδομένων εκπαίδευσης και συγκεκριμένα το 10% των δεδομένων ελέγχου χρησιμοποιήθηκαν για την εκπαίδευση του αλγορίθμου και το υπόλοιπο 90% για την αξιολόγησή του. Η ταξινόμηση που προέκυψε ήταν αρκετά ικανοποιητική και για τις δύο κατηγορίες. Κάποια ενδεικτικά στιγμιότυπα παρουσιάζονται παρακάτω.



Εικόνα 4.76. Επιτυχής ταξινόμηση. Αριστερά: Πολυφασματική δορυφορική εικόνα (RGB). Δεξιά: Ταξινομημένη εικόνα (πράσινο χρώμα: Αμπέλι, καφέ χρώμα: Έδαφος).



Εικόνα 4.77. Άστοχη ταξινόμηση. Αριστερά: Πολυφασματική δορυφορική εικόνα (RGB). Δεξιά: Ταξινομημένη εικόνα (πράσινο χρώμα: Αμπέλι, καφέ χρώμα: Έδαφος).

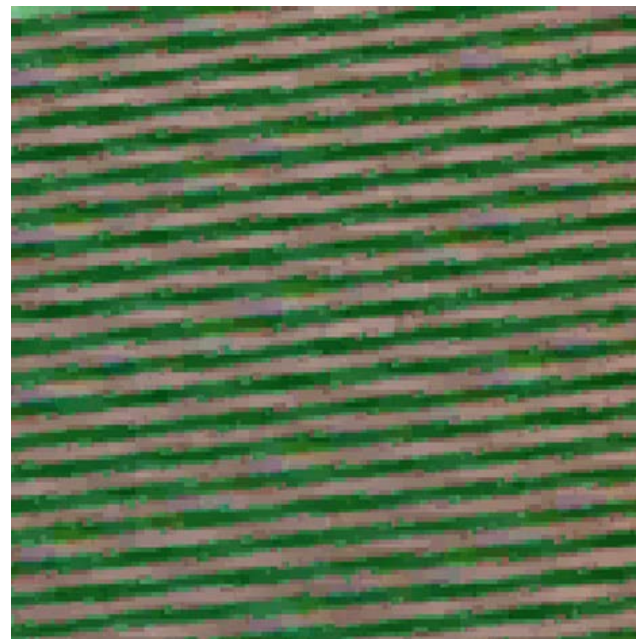
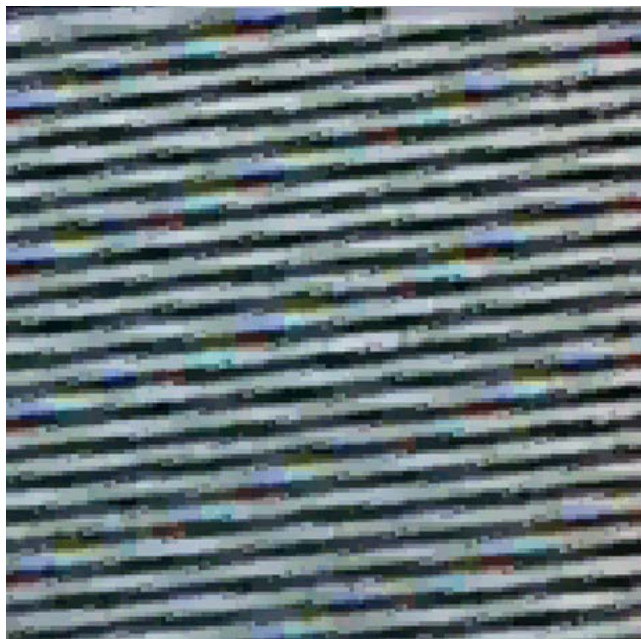
Οι αστοχίες της ταξινόμησης εμφανίστηκαν και πάλι σε σημεία της εικόνας όπου τα αμπέλια δεν ήταν επαρκώς ανεπτυγμένα και μπερδεύονταν με το ενδιάμεσο έδαφος. Η ποσοτική αξιολόγηση κατέδειξε ότι η ταξινόμηση ήταν επιτυχής, με τα περισσότερα εικονοστοιχεία να ταξινομούνται στη σωστή κατηγορία. Ο Πίνακας Σύγχυσης της ταξινόμησης είναι ο κάτωθι.

	ΑΜΠΕΛΙ	ΕΔΑΦΟΣ	ΑΘΡΟΙΣΜΑ	P.A.
ΑΜΠΕΛΙ	108071.0	170.0	108241.0	0.99
ΕΔΑΦΟΣ	144.0	14726.0	14870.0	0.99
ΑΘΡΟΙΣΜΑ	108215.0	14896.0	κappa:	0.99
U.A.	0.99	0.99	O.A.:	0.99

Πίνακας 4.38. Πίνακας Σύγχυσης για πείραμα με ratio = 10% στην περιοχή της Μαντινείας.

Πείραμα 6 (ratio = 5%)

Λόγω των ικανοποιητικών αποτελεσμάτων που προσέδωσαν τα προηγούμενα πειράματα, αποφασίστηκε να γίνει ένα τελευταίο πείραμα με ακόμα λιγότερα δεδομένα εκπαίδευσης. Χρησιμοποιήθηκε το 5% των δεδομένων ελέγχου για την εκπαίδευση του αλγορίθμου και το 95% για την αξιολόγησή του. Η ποιοτική αξιολόγηση κατέδειξε ότι η ταξινόμηση ήταν αρκετά ικανοποιητική, με μικρές αστοχίες που υπήρχαν και στα προηγούμενα πειράματα. Παρακάτω παρουσιάζονται κάποια ενδεικτικά στιγμιότυπα.



Εικόνα 4.78. Επιτυχής ταξινόμηση. Αριστερά: Πολυφασματική δορυφορική εικόνα (RGB). Δεξιά: Ταξινομημένη εικόνα (πράσινο χρώμα: Αμπέλι, καφέ χρώμα: Έδαφος).



Εικόνα 4.79. Άστοχη ταξινόμηση. Αριστερά: Πολυφασματική δορυφορική εικόνα (RGB). Δεξιά: Ταξινομημένη εικόνα (πράσινο χρώμα: Αμπέλι, καφέ χρώμα: Έδαφος).

Οι τιμές των μέτρων ποσοτικής αξιολόγησης παρέμειναν αμετάβλητες συγκριτικά με τα προηγούμενα πειράματα. Επομένως, παρ' όλο που χρησιμοποιήθηκαν λιγότερα δεδομένα εκπαίδευσης, η ταξινόμηση είναι επιτυχής. Ακολουθεί ο Πίνακας Σύγκυσης για την τελευταία ταξινόμηση.

	ΑΜΠΕΛΙ	ΕΔΑΦΟΣ	ΑΘΡΟΙΣΜΑ	P.A.
ΑΜΠΕΛΙ	114064.0	216.0	114280.0	0.99
ΕΔΑΦΟΣ	163.0	15508.0	15671.0	0.99
ΑΘΡΟΙΣΜΑ	114227.0	15724.0	kappa:	0.99
U.A.	0.99	0.99	O.A.:	0.99

Πίνακας 4.39. Πίνακας Σύγκυσης για πείραμα με ratio = 5% στην περιοχή της Μαντινείας.

Η ταξινόμηση που προέκυψε για την περιοχή μελέτης της Μαντινείας μέσω των παραπάνω πειραμάτων παρουσιάζεται για μία υποπεριοχή της εικόνας, ώστε να είναι εμφανής ο εντοπισμός του φυλλώματος στην εικόνα.



Εικόνα 4.80. Αποτέλεσμα ταξινόμησης στην περιοχή μελέτης της Μαντινείας (πράσινο χρώμα: φύλλωμα).

Για τη συγκριτική αξιολόγηση των έξι πειραμάτων για την περιοχή μελέτης της Μαντινείας παρουσιάζονται συγκεντρωτικά τα ποσοτικά τους μέτρα αξιολόγησης.

	Ratio (training – validation)					
	5% - 95%	10% - 90%	20% - 80%	30% - 70%	40% - 60%	50% - 50%
O.A.	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99
kappa	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99
U.A. (average)	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99
P.A. (average)	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99
F1-score	0.98	0.98	0.98	0.98	0.98	0.98

Πίνακας 4.40. Πίνακας Συνολικών Ποσοτικών Αποτελεσμάτων για τα πειράματα στην περιοχή της Μαντινείας.

Από τα συγκεντρωτικά ποσοτικά αποτελέσματα προκύπτει ότι η ταξινόμηση δεν επηρεάζεται από τη μείωση των δεδομένων εκπαίδευσης και το αποτέλεσμα της ταξινόμησης παραμένει ικανοποιητικό σε όλα τα πειράματα.

Περιοχή Μελέτης: Νάουσα 1 (Γιαννακοχώρι)

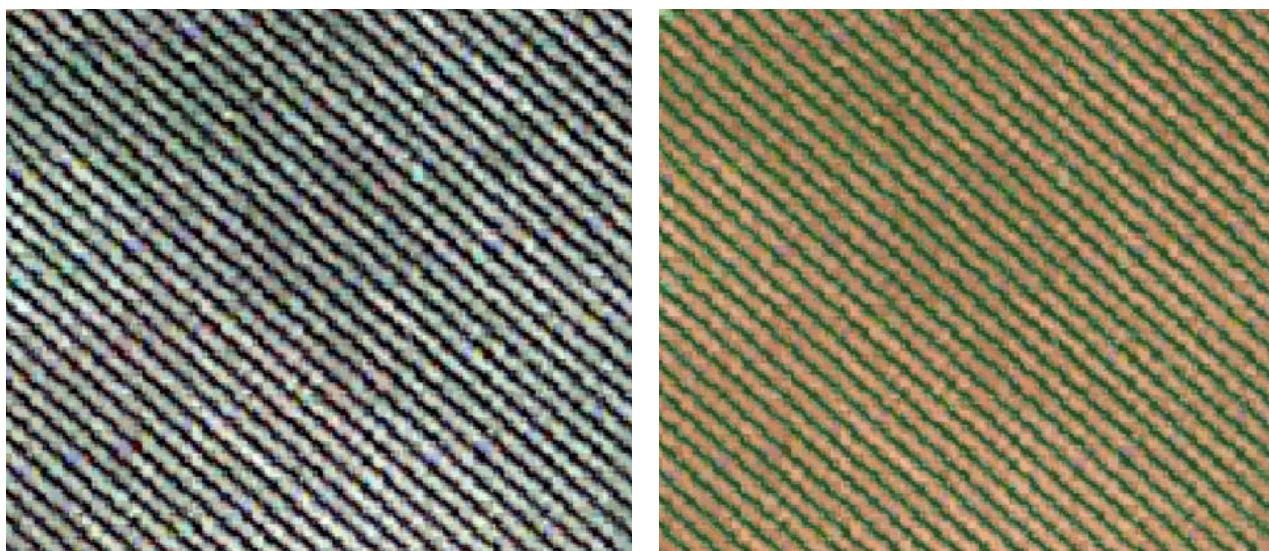
Για την περιοχή μελέτης της Νάουσας 1 υλοποιήθηκαν έξι πειράματα με έξι διαφορετικά ποσοστά δεδομένων εκπαίδευσης. Στόχος ήταν η αξιολόγηση της αποτελεσματικότητας του αλγορίθμου στην ταξινόμηση της εικόνας εκπαιδεύοντάς τον με διαφορετικά ποσοστά. Τα πειράματα υλοποιήθηκαν στο σύνολο των αμπελοτεμαχίων της περιοχής, όπως αυτά παρουσιάζονται στην παρακάτω εικόνα. Λόγω περιορισμένου χώρου, τα αποτελέσματα των πειραμάτων παρατίθενται για υποπεριοχές των αμπελοτεμαχίων, ώστε να είναι ευκρινέστερη η ταξινόμηση που προέκυψε στο εκάστοτε πείραμα.



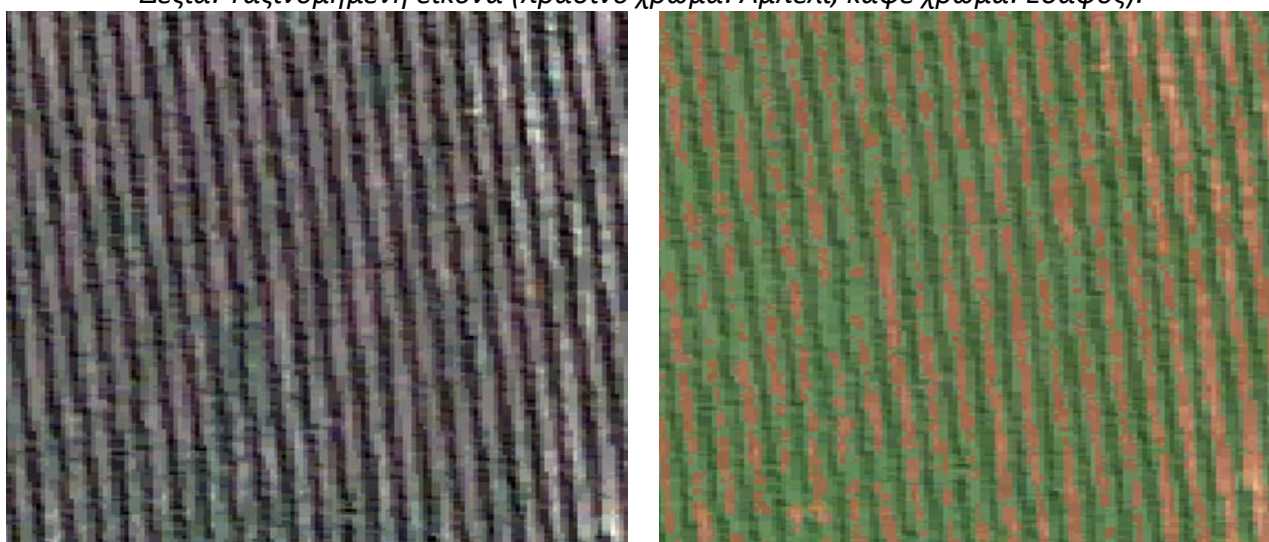
Εικόνα 4.81. Αμπελοτεμάχια περιοχής Νάουσας 1.

Πείραμα 1 (ratio = 50%)

Στο πρώτο πείραμα χρησιμοποιήθηκε το 50% των δεδομένων ελέγχου για την εκπαίδευση του αλγορίθμου και το υπόλοιπο 50% των δεδομένων για την αξιολόγησή του. Η ταξινόμηση που προέκυψε ήταν ικανοποιητική, σύμφωνα με την ποιοτική αξιολόγηση. Παρακάτω παρατίθενται ορισμένα χαρακτηριστικά στιγμιότυπα.



Εικόνα 4.82. Επιτυχής ταξινόμηση. Αριστερά: Πολυφασματική δορυφορική εικόνα (RGB). Δεξιά: Ταξινομημένη εικόνα (πράσινο χρώμα: Αμπέλι, καφέ χρώμα: Έδαφος).



Εικόνα 4.83. Άστοχη ταξινόμηση. Αριστερά: Πολυφασματική δορυφορική εικόνα (RGB). Δεξιά: Ταξινομημένη εικόνα (πράσινο χρώμα: Αμπέλι, καφέ χρώμα: Έδαφος).

Κάποιες αστοχίες που προέκυψαν κατά την ταξινόμηση (Εικόνα 4.70) οφείλονται στην ελλιπή ανάπτυξη των αμπελιών και στην παρεμβολή εδάφους ενδιάμεσα των πρέμνων, που έχουν ως αποτέλεσμα την φασματική ομοιογένεια των εικονοστοιχείων εδάφους και αμπέλου. Επομένως, σε περιορισμένο μέρος της εικόνας κάποια εικονοστοιχεία εδάφους ταξινομήθηκαν εσφαλμένα στην κατηγορία Αμπέλι.

Τα ποσοτικά μέτρα αξιολόγησης καταδεικνύουν μία επιτυχή ταξινόμηση, με την Ολική Ακρίβεια να φτάνει το 99% και το δείκτη kappa να ισούται με 0,97. Παρακάτω παρουσιάζεται ο Πίνακας Σύγχυσης της ταξινόμησης.

	ΑΜΠΕΛΙ	ΕΔΑΦΟΣ	ΑΘΡΟΙΣΜΑ	P.A.
ΑΜΠΕΛΙ	42967.0	165.0	43132.0	0.99
ΕΔΑΦΟΣ	104.0	4583.0	4687.0	0.98

ΑΘΡΟΙΣΜΑ	43071.0	4748.0	κappa:	0.97
U.A.	0.99	0.97	O.A.:	0.99

Πίνακας 4.41. Πίνακας Σύγχυσης για πείραμα με ratio = 50% στην περιοχή της Νάουσας 1.

Πείραμα 2 (ratio = 40%)

Στο δεύτερο πείραμα χρησιμοποιήθηκε το 40% των δεδομένων ελέγχου για την εκπαίδευση του ταξινομητή και το 60% για την αξιολόγησή του. Η ταξινόμηση ήταν επιτυχής στο μεγαλύτερο μέρος της εικόνας. Χαρακτηριστικά στιγμιότυπα παρατίθενται παρακάτω.



Εικόνα 4.84. Επιτυχής ταξινόμηση. Αριστερά: Πολυφασματική δορυφορική εικόνα (RGB). Δεξιά: Ταξινομημένη εικόνα (πράσινο χρώμα: Αμπέλι, καφέ χρώμα: Έδαφος).



Εικόνα 4.85. Άστοχη ταξινόμηση. Αριστερά: Πολυφασματική δορυφορική εικόνα (RGB). Δεξιά: Ταξινομημένη εικόνα (πράσινο χρώμα: Αμπέλι, καφέ χρώμα: Έδαφος).

Οι αστοχίες της ταξινόμησης εντοπίστηκαν, όπως και στο προηγούμενο πείραμα, σε αμπέλια με ελλιπή ανάπτυξη, των οποίων η φασματική συμπεριφορά μοιάζει με αυτή του εδάφους. Για το λόγο αυτό υπήρξαν κάποια εικονοστοιχεία εδάφους που ταξινομήθηκαν στην κατηγορία Αμπέλι.

Σύμφωνα με την ποσοτική αξιολόγηση, η ταξινόμηση είναι επιτυχής με ποσοστό Ολικής Ακρίβειας ίσο με 99% και kappa ίσο με 0,97. Παρατηρείται ότι και τα δύο μεγέθη έχουν τις ίδιες τιμές με το προηγούμενο πείραμα, επομένως η αποτελεσματικότητα του αλγορίθμου δεν επηρεάστηκε από τη μείωση των δεδομένων εκπαίδευσης.

	ΑΜΠΕΛΙ	ΕΔΑΦΟΣ	ΑΘΡΟΙΣΜΑ	P.A.
ΑΜΠΕΛΙ	51565.0	199.0	51764.0	0.99
ΕΔΑΦΟΣ	120.0	5499.0	5619.0	0.98
ΑΘΡΟΙΣΜΑ	51685.0	5698.0	kappa:	0.97
U.A.	0.99	0.97	O.A.:	0.99

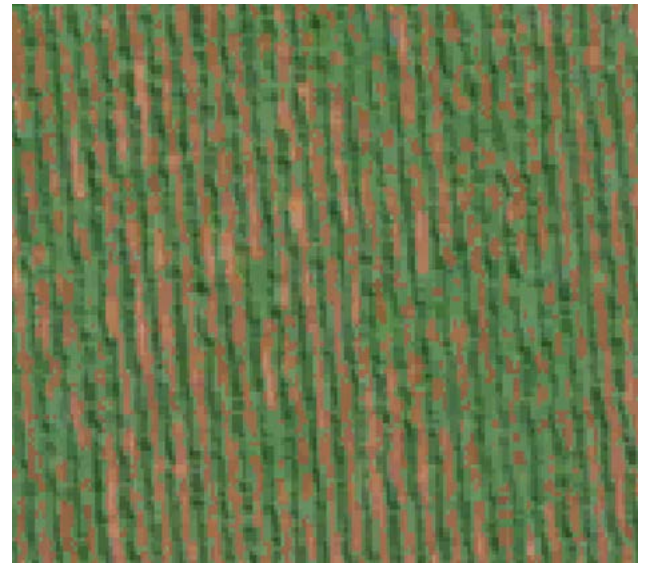
Πίνακας 4.42. Πίνακας Σύγχυσης για πείραμα με ratio = 40% στην περιοχή της Νάουσας 1.

Πείραμα 3 (ratio = 30%)

Στο τρίτο πείραμα ο αλγόριθμος εκπαιδεύτηκε με το 30% των δεδομένων ελέγχου και η αξιολόγησή του έγινε με το 70% αυτών. Η ταξινόμηση που προέκυψε κρίνεται επιτυχής ως προς την ποιοτική της αξιολόγηση. Παρακάτω παρουσιάζονται κάποια χαρακτηριστικά σημεία της ταξινομημένης εικόνας.



Εικόνα 4.86. Επιτυχής ταξινόμηση. Αριστερά: Πολυφασματική δορυφορική εικόνα (RGB). Δεξιά: Ταξινομημένη εικόνα (πράσινο χρώμα: Αμπέλι, καφέ χρώμα: Έδαφος).



Εικόνα 4.87. Άστοχη ταξινόμηση. Αριστερά: Πολυφασματική δορυφορική εικόνα (RGB). Δεξιά: Ταξινομημένη εικόνα (πράσινο χρώμα: Αμπέλι, καφέ χρώμα: Έδαφος).

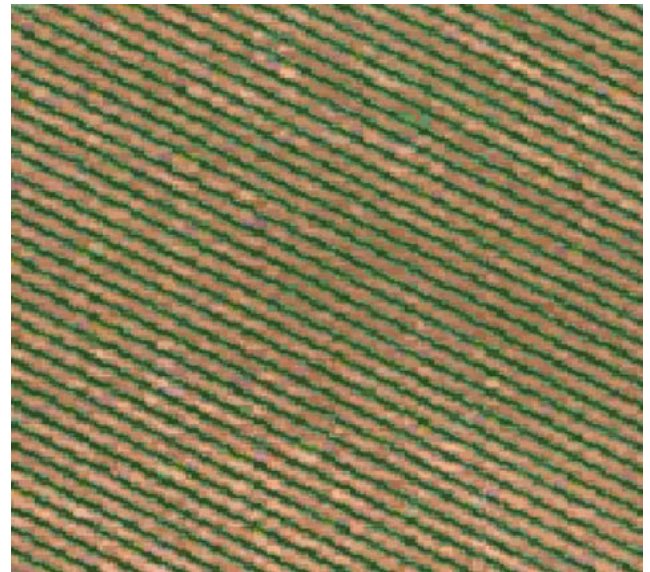
Οι αστοχίες που παρουσιάστηκαν ήταν όμοιες με τα προηγούμενα πειράματα και εντοπίστηκαν σε περιορισμένη έκταση στην εικόνα. Τα ποσοτικά μέτρα αξιολόγησης διατήρησαν τις ίδιες τιμές με τα προηγούμενα πειράματα και η ταξινόμηση θεωρείται επιτυχής.

	ΑΜΠΕΛΙ	ΕΔΑΦΟΣ	ΑΘΡΟΙΣΜΑ	P.A.
ΑΜΠΕΛΙ	60121.0	226.0	60347.0	0.99
ΕΔΑΦΟΣ	178.0	6422.0	6600.0	0.97
ΑΘΡΟΙΣΜΑ	60299.0	6648.0	kappa:	0.97
U.A.	0.99	0.97	O.A.:	0.99

Πίνακας 4.43. Πίνακας Σύγχυσης για πείραμα με ratio = 30% στην περιοχή της Νάουσας 1.

Πείραμα 4 (ratio = 20%)

Στο τέταρτο πείραμα χρησιμοποιήθηκε το 20% των δεδομένων ελέγχου για την εκπαίδευση του αλγορίθμου και το 80% για τη αξιολόγησή του. Και σε αυτή την ταξινόμηση ο αλγόριθμος ήταν αποτελεσματικός, με κάποιες αστοχίες να προκύπτουν στα ίδια σημεία με τα προηγούμενα πειράματα. Παρακάτω παρατίθενται κάποια στιγμιότυπα της ταξινόμησης.



Εικόνα 4.88. Επιτυχής ταξινόμηση. Αριστερά: Πολυφασματική δορυφορική εικόνα (RGB). Δεξιά: Ταξινομημένη εικόνα (πράσινο χρώμα: Αμπέλι, καφέ χρώμα: Έδαφος).



Εικόνα 4.89. Αστοχη ταξινόμηση. Αριστερά: Πολυφασματική δορυφορική εικόνα (RGB). Δεξιά: Ταξινομημένη εικόνα (πράσινο χρώμα: Αμπέλι, καφέ χρώμα: Έδαφος).

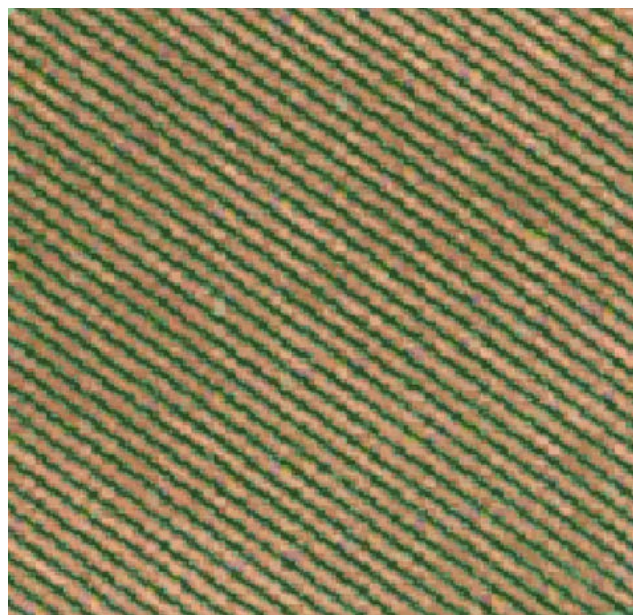
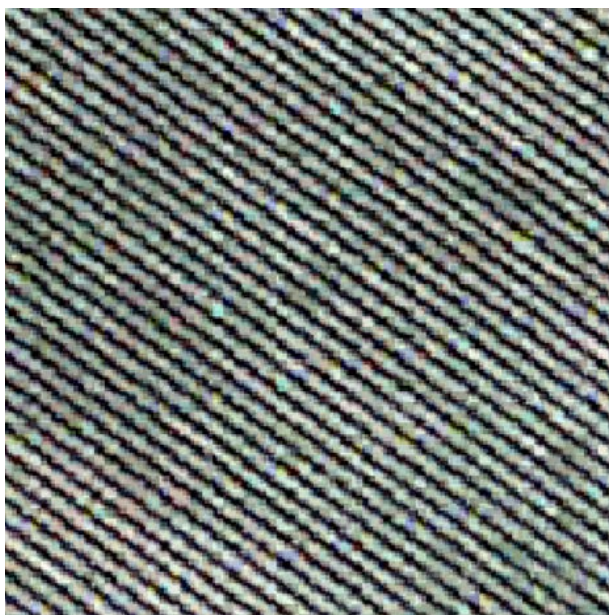
Τα ποσοτικά μέτρα αξιολόγησης (Ολική Ακρίβεια, δείκτης kappa) διατήρησαν τις ίδιες τιμές με τα προηγούμενα πειράματα, επομένως η ταξινόμηση δεν επηρεάστηκε από τη μείωση των δεδομένων εκπαίδευσης. Ο Πίνακας Σύγκρισης της ταξινόμησης είναι ο ακόλουθος.

	ΑΜΠΕΛΙ	ΕΔΑΦΟΣ	ΑΘΡΟΙΣΜΑ	P.A.
ΑΜΠΕΛΙ	68712.0	264.0	68976.0	0.99
ΕΔΑΦΟΣ	201.0	7333.0	7534.0	0.97
ΑΘΡΟΙΣΜΑ	68913.0	7597.0	kappa:	0.97
U.A.	0.99	0.97	O.A.:	0.99

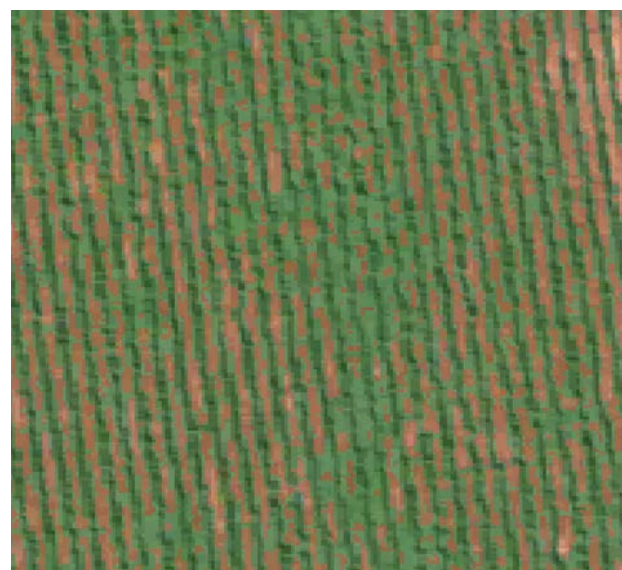
Πίνακας 4.44. Πίνακας Σύγκρισης για πείραμα με ratio = 20% στην περιοχή της Νάουσας 1.

Πείραμα 5 (ratio = 10%)

Στο επόμενο πείραμα χρησιμοποιήθηκαν ακόμα λιγότερα δεδομένα εκπαίδευσης και συγκεκριμένα το 10% των δεδομένων ελέγχου χρησιμοποιήθηκε για την εκπαίδευση του αλγορίθμου και το 90% για την αξιολόγησή του. Ποιοτικά η αξιολόγηση θεωρείται επιτυχής, με τις αστοχίες να διατηρούνται στα σημεία με μικρά και ελλιπώς ανεπτυγμένα αμπέλια. Παρακάτω παρουσιάζονται κάποια χαρακτηριστικά παραδείγματα ταξινόμησης.



Εικόνα 4.90. Επιτυχής ταξινόμηση. Αριστερά: Πολυφασματική δορυφορική εικόνα (RGB). Δεξιά: Ταξινομημένη εικόνα (πράσινο χρώμα: Αμπέλι, καφέ χρώμα: Έδαφος).



Εικόνα 4.91. Άστοχη ταξινόμηση. Αριστερά: Πολυφασματική δορυφορική εικόνα (RGB). Δεξιά: Ταξινομημένη εικόνα (πράσινο χρώμα: Αμπέλι, καφέ χρώμα: Έδαφος).

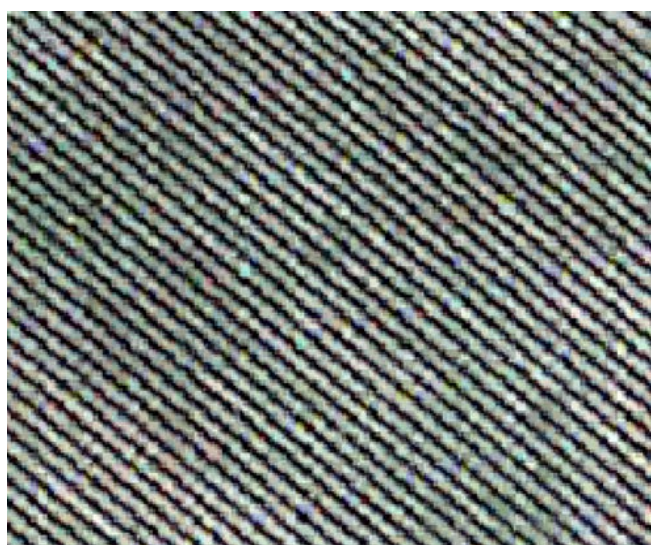
Η ποσοτική αξιολόγηση κατέδειξε μία επιτυχή ταξινόμηση, με την Ολική Ακρίβεια να φτάνει και πάλι το 99% και το δείκτη kappa να μειώνεται στο 0,96 σε σχέση με τα προηγούμενα πειράματα που ήταν ίσος με 0,97. Ο Πίνακας Σύγκυσης της ταξινόμησης παρουσιάζεται παρακάτω.

	ΑΜΠΕΛΙ	ΕΔΑΦΟΣ	ΑΘΡΟΙΣΜΑ	P.A.
ΑΜΠΕΛΙ	77297.0	363.0	77660.0	0.99
ΕΔΑΦΟΣ	230.0	8184.0	8414.0	0.97
ΑΘΡΟΙΣΜΑ	77527.0	8547.0	kappa:	0.96
U.A.	0.99	0.96	O.A.:	0.99

Πίνακας 4.45. Πίνακας Σύγκυσης για πείραμα με ratio = 10% στην περιοχή της Νάουσας 1.

Πείραμα 6 (ratio = 5%)

Καθώς από τα προηγούμενα πειράματα προέκυψαν επιτυχείς ταξινομήσεις, αποφασίστηκε να γίνει άλλη μία ταξινόμηση με μικρότερο ποσοστό δεδομένων εκπαίδευσης. Επομένως, χρησιμοποιήθηκε μόλις το 5% των δεδομένων ελέγχου για την εκπαίδευση του ταξινομητή και το 95% για την αξιολόγησή του. Η ταξινόμηση θεωρείται επιτυχής, σύμφωνα με την ποιοτική αξιολόγηση. Αστοχίες παρατηρήθηκαν στα σημεία με παρόμοιες φασματικές υπογραφές των αμπελιών και του εδάφους. Παρακάτω παρουσιάζονται ορισμένα χαρακτηριστικά στιγμιότυπα.



Εικόνα 4.92. Επιτυχής ταξινόμηση. Αριστερά: Πολυφασματική δορυφορική εικόνα (RGB). Δεξιά: Ταξινομημένη εικόνα (πράσινο χρώμα: Αμπέλι, καφέ χρώμα: Έδαφος).



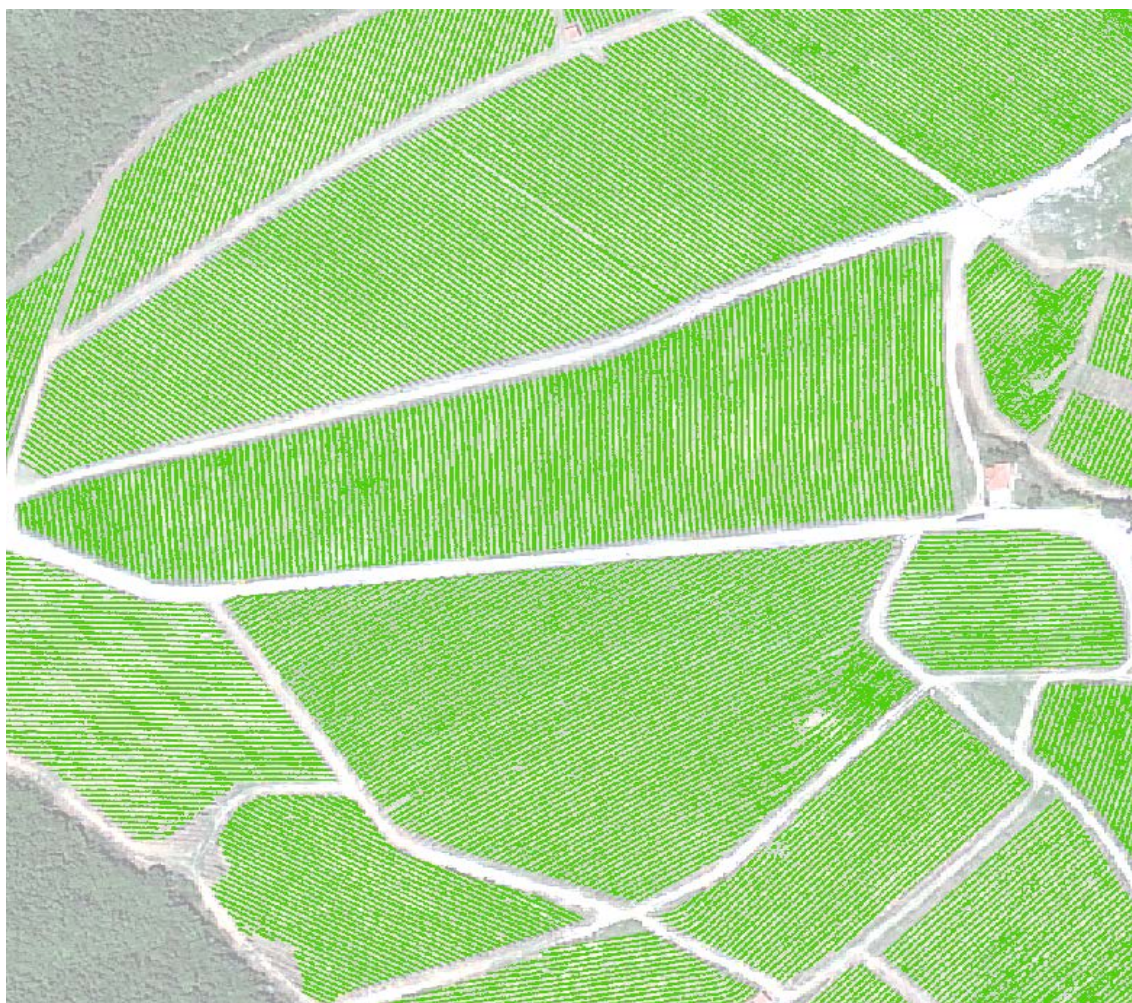
Εικόνα 4.93. Άστοχη ταξινόμηση. Αριστερά: Πολυφασματική δορυφορική εικόνα (RGB). Δεξιά: Ταξινομημένη εικόνα (πράσινο χρώμα: Αμπέλι, καφέ χρώμα: Έδαφος).

Τα ποσοτικά μέτρα αξιολόγησης διατήρησαν τις ίδιες τιμές με τα αντίστοιχα του προηγούμενου πειράματος (με ratio = 10%), επομένως η ταξινόμηση δεν επηρεάστηκε από την περαιτέρω μείωση των δεδομένων εκπαίδευσης και θεωρείται επιτυχής. Παρακάτω παρουσιάζεται ο Πίνακας Σύγκρισης του πειράματος.

	ΑΜΠΕΛΙ	ΕΔΑΦΟΣ	ΑΘΡΟΙΣΜΑ	P.A.
ΑΜΠΕΛΙ	81557.0	397.0	81954.0	0.99
ΕΔΑΦΟΣ	277.0	8625.0	8902.0	0.97
ΑΘΡΟΙΣΜΑ	81834.0	9022.0	kappa:	0.96
U.A.	0.99	0.96	O.A.:	0.99

Πίνακας 4.46. Πίνακας Σύγκρισης για πείραμα με ratio = 5% στην περιοχή της Νάουσας 1.

Η ταξινόμηση που προέκυψε για την περιοχή μελέτης της Νάουσας 1 μέσω των παραπάνω πειραμάτων παρουσιάζεται για μία υποπεριοχή της εικόνας, ώστε να είναι εμφανής ο εντοπισμός του φυλλώματος στην εικόνα.



Εικόνα 4.94. Αποτέλεσμα ταξινόμησης στην περιοχή μελέτης της Νάουσας 1 (πράσινο χρώμα: φύλλωμα).

Για τη συγκριτική αξιολόγηση των έξι πειραμάτων για την περιοχή μελέτης της Νάουσας 1 παρουσιάζονται συγκεντρωτικά τα ποσοτικά μέτρα αξιολόγησής τους.

	Ratio (training – validation)					
	5% - 95%	10% - 90%	20% - 80%	30% - 70%	40% - 60%	50% - 50%
O.A.	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99
kappa	0.96	0.96	0.97	0.97	0.97	0.97
U.A.	0.98	0.98	0.99	0.99	0.99	0.99
(average)						
P.A.	0.98	0.98	0.98	0.98	0.99	0.99
(average)						
F1-score	0.98	0.98	0.98	0.98	0.98	0.98

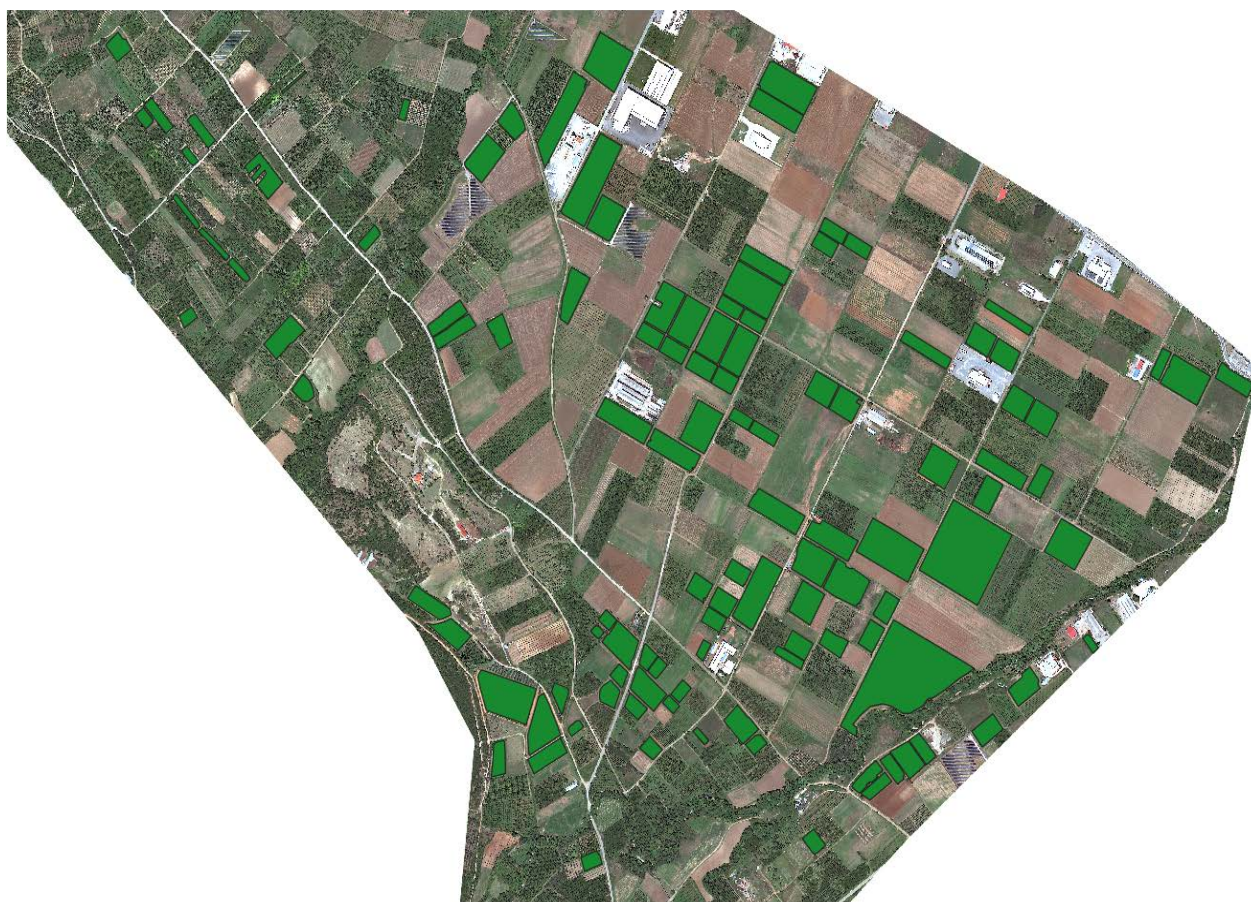
Πίνακας 4.47. Πίνακας Συνολικών Ποσοτικών Αποτελεσμάτων για τα πειράματα στην περιοχή της Νάουσας 1.

Από τα παραπάνω συγκεντρωτικά αποτελέσματα προκύπτει το συμπέρασμα ότι η ταξινόμηση δεν επηρεάζεται από το ποσοστό δεδομένων εκπαίδευσης που χρησιμοποιούνται, καθώς η Ολική Ακρίβεια παραμένει σταθερή. Επομένως, τα

δεδομένα ελέγχου είναι αντιπροσωπευτικά και για τις δύο κατηγορίες ταξινόμησης. Επιπλέον, ο δείκτης kappa μειώνεται λίγο για τα πειράματα με ratio 5% και 10% και αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι ο δείκτης λαμβάνει υπόψη τις πιθανότητες τυχαίας κατηγοριοποίησης των ορθά ταξινομημένων εικονοστοιχείων στις κλάσεις τους και αφού τις συγκρίνει με την πραγματική ταξινόμηση, εκφράζει το ποσοστό των σφαλμάτων που απέφυγε η πραγματική ταξινόμηση. Δηλαδή όσο μεγαλύτερη ήταν η εκπαίδευση του αλγορίθμου, τόσα περισσότερα σφάλματα απέφυγε. Συνολικά, η ταξινόμηση της εικόνας της Νάουσας 1 κρίνεται επιτυχής με βάση την ποσοτική αξιολόγηση.

Περιοχή Μελέτης: Νάουσα 2 (Στενήμαχος)

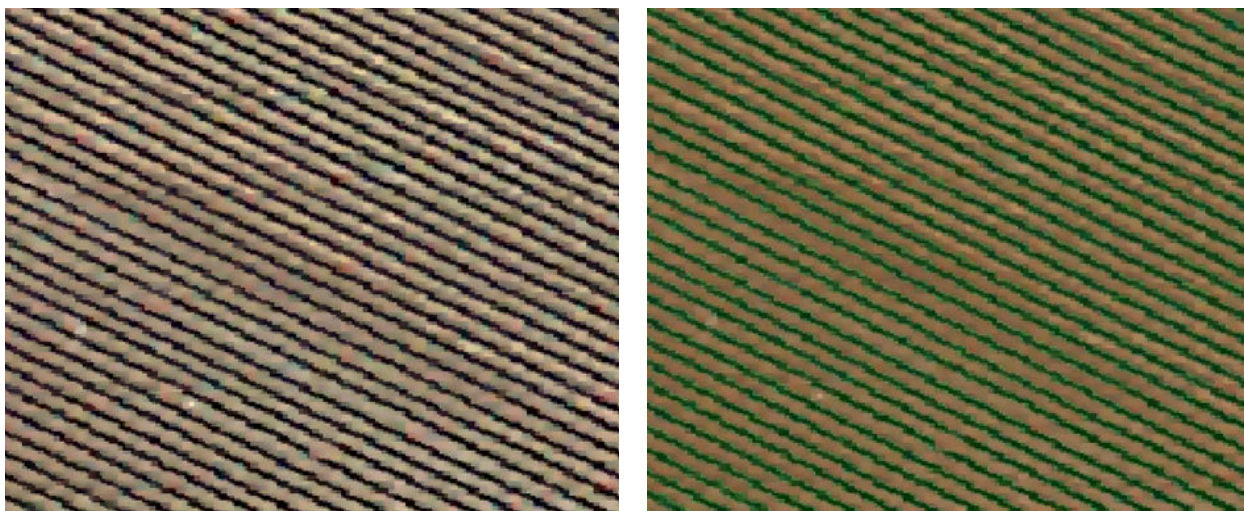
Για την περιοχή μελέτης της Νάουσας 2 υλοποιήθηκαν έξι πειράματα, με έξι διαφορετικά ποσοστά δεδομένων εκπαίδευσης. Στόχος ήταν η αξιολόγηση της αποτελεσματικότητας του αλγορίθμου στην ταξινόμηση της εικόνας. Τα πειράματα υλοποιήθηκαν στο σύνολο των αμπελοτεμαχίων της περιοχής, όπως αυτά παρουσιάζονται στην παρακάτω εικόνα. Λόγω περιορισμένου χώρου, τα αποτελέσματα των πειραμάτων παρατίθενται για υποπεριοχές των αμπελοτεμαχίων, ώστε να είναι ευκρινέστερη η ταξινόμηση που προέκυψε στο εκάστοτε πείραμα.



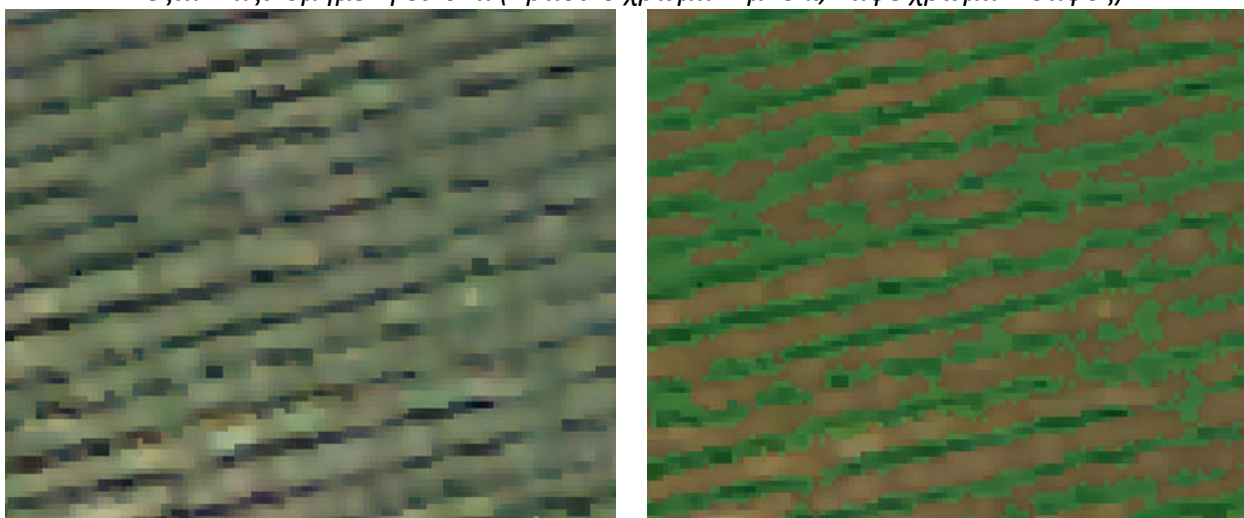
Εικόνα 4.95. Αμπελοτεμάχια περιοχής Νάουσας 2.

Πείραμα 1 (ratio = 50%)

Στο πρώτο πείραμα χρησιμοποιήθηκε το 50% των δεδομένων ελέγχου για την εκπαίδευση του αλγορίθμου και το υπόλοιπο 50% για την αξιολόγησή του. Η ταξινόμηση που προέκυψε ήταν ικανοποιητική στο μεγαλύτερο μέρος της εικόνας. Κάποια χαρακτηριστικά στιγμιότυπα παρουσιάζονται παρακάτω.



Εικόνα 4.96. Επιτυχής ταξινόμηση. Αριστερά: Πολυφασματική δορυφορική εικόνα (RGB). Δεξιά: Ταξινομημένη εικόνα (πράσινο χρώμα: Αμπέλι, καφέ χρώμα: Έδαφος).



Εικόνα 4.97. Άστοχη ταξινόμηση. Αριστερά: Πολυφασματική δορυφορική εικόνα (RGB). Δεξιά: Ταξινομημένη εικόνα (πράσινο χρώμα: Αμπέλι, καφέ χρώμα: Έδαφος).

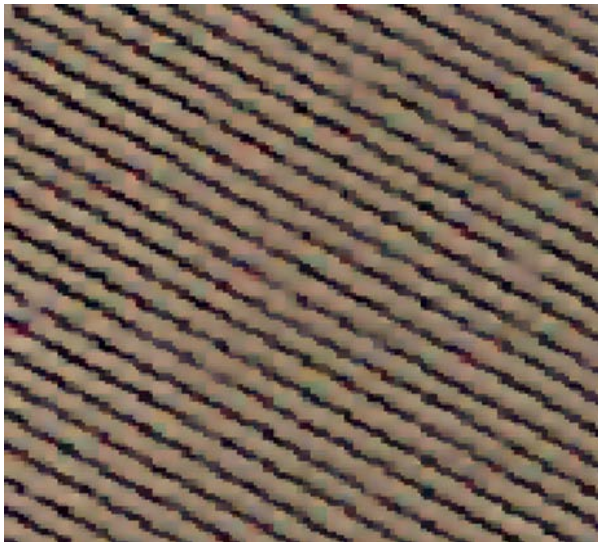
Οι αστοχίες της ταξινόμησης εντοπίζονται σε σημεία όπου τα αμπέλια είναι απεριποίητα και υπάρχει έντονη αυτοφυής βλάστηση μεταξύ των γραμμών των αμπελιών. Στην εικόνα 4.82 φαίνονται εικονοστοιχεία εδάφους να έχουν λανθασμένα ταξινομηθεί στην κατηγορία Αμπέλι. Από την ποσοτική αξιολόγηση προκύπτει ότι η ταξινόμηση είναι επιτυχής, με την Ολική Ακρίβεια να φτάνει το 99% και το δείκτη kappa το 0,98. Ο Πίνακας Σύγχυσης της ταξινόμησης παρατίθεται παρακάτω.

	ΑΜΠΕΛΙ	ΕΔΑΦΟΣ	ΑΘΡΟΙΣΜΑ	P.A.
ΑΜΠΕΛΙ	15753.0	86.0	15839.0	0.99
ΕΔΑΦΟΣ	57.0	6041.0	6098.0	0.99
ΑΘΡΟΙΣΜΑ	15810.0	6127.0	κappa:	0.98
U.A.	0.99	0.99	O.A.:	0.99

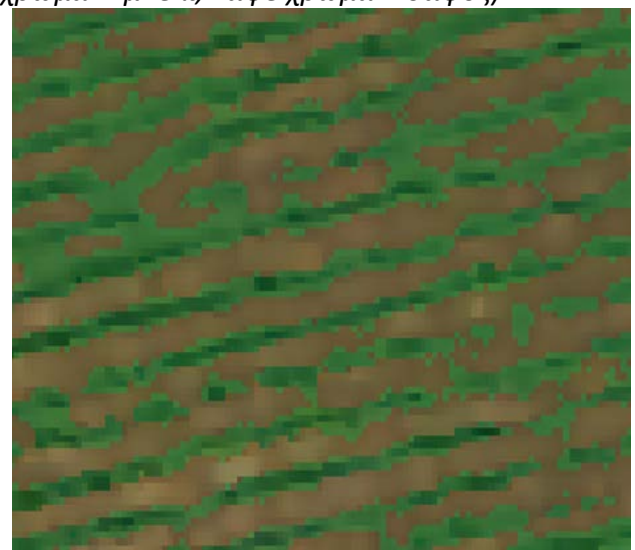
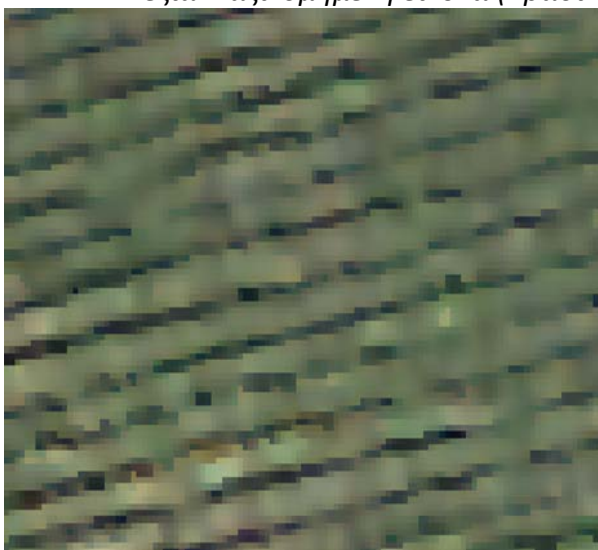
Πίνακας 4.48. Πίνακας Σύγχυσης για πείραμα με ratio = 50% στην περιοχή της Νάουσας 2.

Πείραμα 2 (ratio = 40%)

Στο δεύτερο πείραμα χρησιμοποιήθηκε το 40% των δεδομένων ελέγχου για την εκπαίδευση του αλγορίθμου και το 60% για την αξιολόγησή του. Η ταξινόμηση θεωρείται επιτυχής, σύμφωνα με την ποιοτική αξιολόγηση. Κάποια χαρακτηριστικά αποσπάσματα της ταξινομημένης εικόνας παρουσιάζονται παρακάτω.



Εικόνα 4.98. Επιτυχής ταξινόμηση. Αριστερά: Πολυφασματική δορυφορική εικόνα (RGB). Δεξιά: Ταξινομημένη εικόνα (πράσινο χρώμα: Αμπέλι, καφέ χρώμα: Έδαφος).



Εικόνα 4.99. Άστοχη ταξινόμηση. Αριστερά: Πολυφασματική δορυφορική εικόνα (RGB). Δεξιά: Ταξινομημένη εικόνα (πράσινο χρώμα: Αμπέλι, καφέ χρώμα: Έδαφος).

Οι αστοχίες της ταξινόμησης εντοπίζονται και πάλι σε σημεία όπου οι φασματικές υπογραφές αμπελιών και εδάφους είναι παρόμοιες. Επομένως, κάποια εικονοστοιχεία που στην πραγματικότητα ανήκουν στην κατηγορία Έδαφος, ταξινομήθηκαν εσφαλμένα στην κατηγορία Αμπέλι.

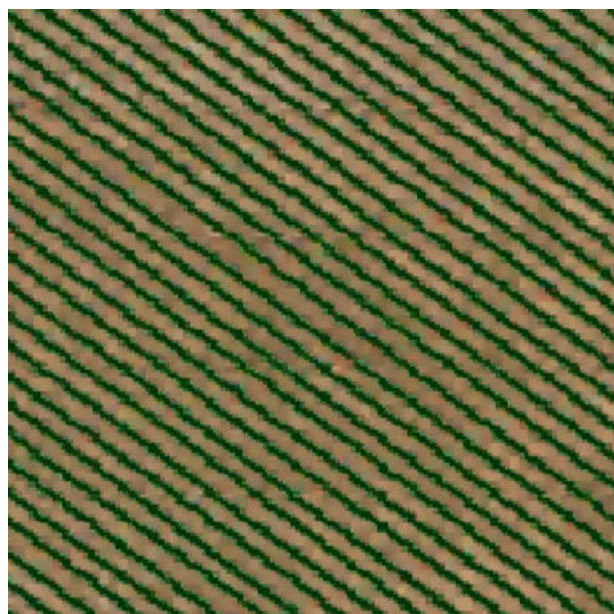
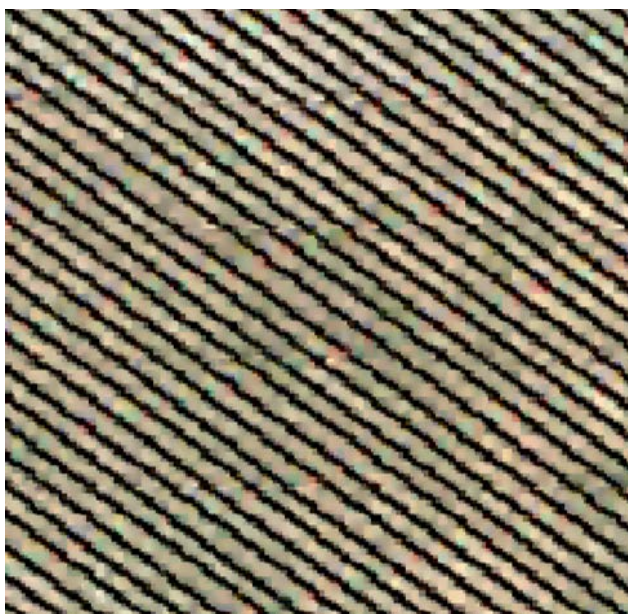
Η ποσοτική αξιολόγηση είναι εξίσου ικανοποιητική με το προηγούμενο πείραμα, παρά το γεγονός ότι χρησιμοποιήθηκαν λιγότερα δεδομένα εκπαίδευσης. Παρακάτω παρατίθεται ο Πίνακας Σύγχυσης του πειράματος.

	ΑΜΠΕΛΙ	ΕΔΑΦΟΣ	ΑΘΡΟΙΣΜΑ	P.A.
ΑΜΠΕΛΙ	18884.0	102.0	18986.0	0.99
ΕΔΑΦΟΣ	88.0	7250.0	7338.0	0.99
ΑΘΡΟΙΣΜΑ	18972.0	7352.0	κappa:	0.98
U.A.	0.99	0.99	O.A.:	0.99

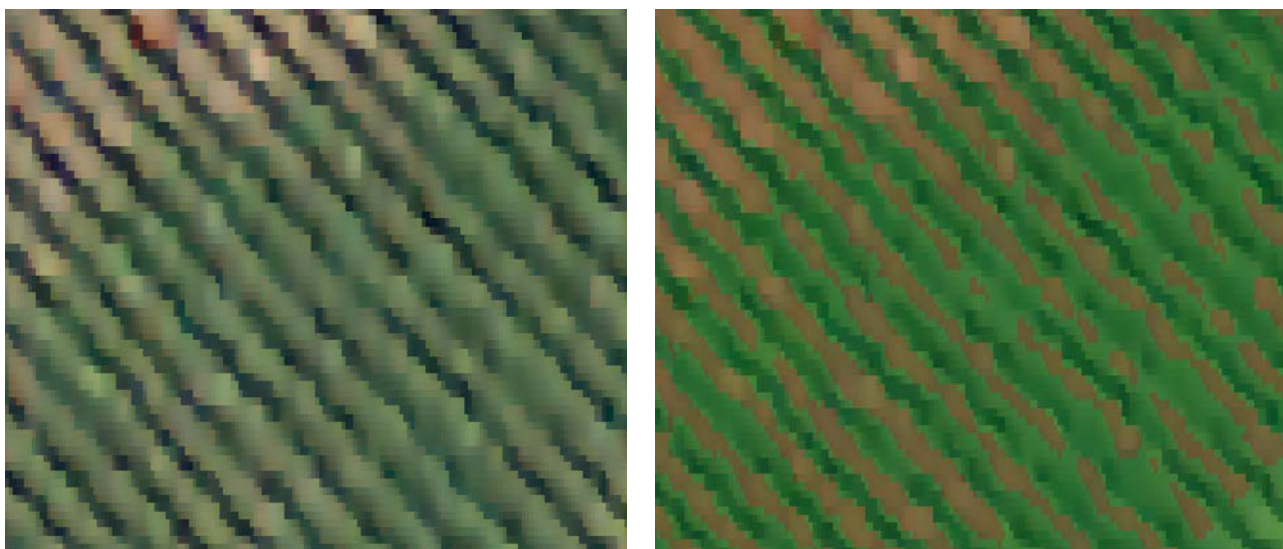
Πίνακας 4.49. Πίνακας Σύγχυσης για πείραμα με ratio = 40% στην περιοχή της Νάουσας 2.

Πείραμα 3 (ratio = 30%)

Στο τρίτο πείραμα, το 30% των δεδομένων ελέγχου χρησιμοποιήθηκαν για την εκπαίδευση του αλγορίθμου και το 70% για την αξιολόγησή του. Το αποτέλεσμα της ταξινόμησης είναι ικανοποιητικό, με τις αστοχίες που προέκυψαν να είναι ίδιες με αυτές στα προηγούμενα δύο πειράματα. Παρακάτω παρουσιάζονται κάποια ενδεικτικά στιγμιότυπα της ταξινόμησης.



Εικόνα 4.100. Επιτυχής ταξινόμηση. Αριστερά: Πολυφασματική δορυφορική εικόνα (RGB). Δεξιά: Ταξινομημένη εικόνα (πράσινο χρώμα: Αμπέλι, καφέ χρώμα: Έδαφος).



Εικόνα 4.101. Άστοχη ταξινόμηση. Αριστερά: Πολυφασματική δορυφορική εικόνα (RGB). Δεξιά: Ταξινομημένη εικόνα (πράσινο χρώμα: Αμπέλι, καφέ χρώμα: Έδαφος).

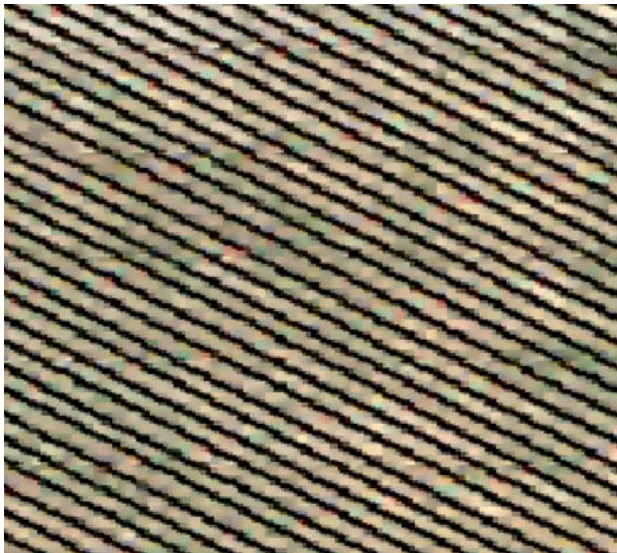
Η ποσοτική αξιολόγηση καταδεικνύει μία επιτυχή ταξινόμηση, με τα ποσοτικά μέτρα της Ολικής Ακρίβειας και του δείκτη kappa να διατηρούν τις ίδιες τιμές με τα προηγούμενα πειράματα. Παρακάτω παρουσιάζεται ο Πίνακας Σύγχυσης της ταξινόμησης.

	ΑΜΠΕΛΙ	ΕΔΑΦΟΣ	ΑΘΡΟΙΣΜΑ	P.A.
ΑΜΠΕΛΙ	22034.0	113.0	22147.0	0.99
ΕΔΑΦΟΣ	100.0	8465.0	8565.0	0.99
ΑΘΡΟΙΣΜΑ	22134.0	8578.0	kappa:	0.98
U.A.	0.99	0.99	O.A.:	0.99

Πίνακας 4.50. Πίνακας Σύγχυσης για πείραμα με ratio = 30% στην περιοχή της Νάουσας 2.

Πείραμα 4 (ratio = 20%)

Στο τέταρτο πείραμα χρησιμοποιήθηκε το 20% των δεδομένων ελέγχου για την εκπαίδευση του ταξινομητή και το 80% για την αξιολόγησή του. Σύμφωνα με την ποιοτική αξιολόγηση, η ταξινόμηση θεωρείται επιτυχής στο μεγαλύτερο μέρος της εικόνας. Οι αστοχίες που προέκυψαν εντοπίζονται στα ίδια σημεία με τα προηγούμενα πειράματα, όπου δεν είναι ευδιάκριτη η διαφορά στις φασματικές υπογραφές των δύο κατηγοριών. Επιπλέον, οι αστοχίες είναι πιο περιορισμένες συγκριτικά με τα προηγούμενα πειράματα και αυτό σχετίζεται με την αντιπροσωπευτικότητα του δείγματος των δεδομένων εκπαίδευσης. Παρακάτω παρουσιάζονται κάποια χαρακτηριστικά στιγμιότυπα της ταξινόμησης.



Εικόνα 4.102. Επιτυχής ταξινόμηση. Αριστερά: Πολυφασματική δορυφορική εικόνα (RGB).
Δεξιά: Ταξινομημένη εικόνα (πράσινο χρώμα: Αμπέλι, καφέ χρώμα: Έδαφος).



Εικόνα 4.103. Άστοχη ταξινόμηση. Αριστερά: Πολυφασματική δορυφορική εικόνα (RGB).
Δεξιά: Ταξινομημένη εικόνα (πράσινο χρώμα: Αμπέλι, καφέ χρώμα: Έδαφος).

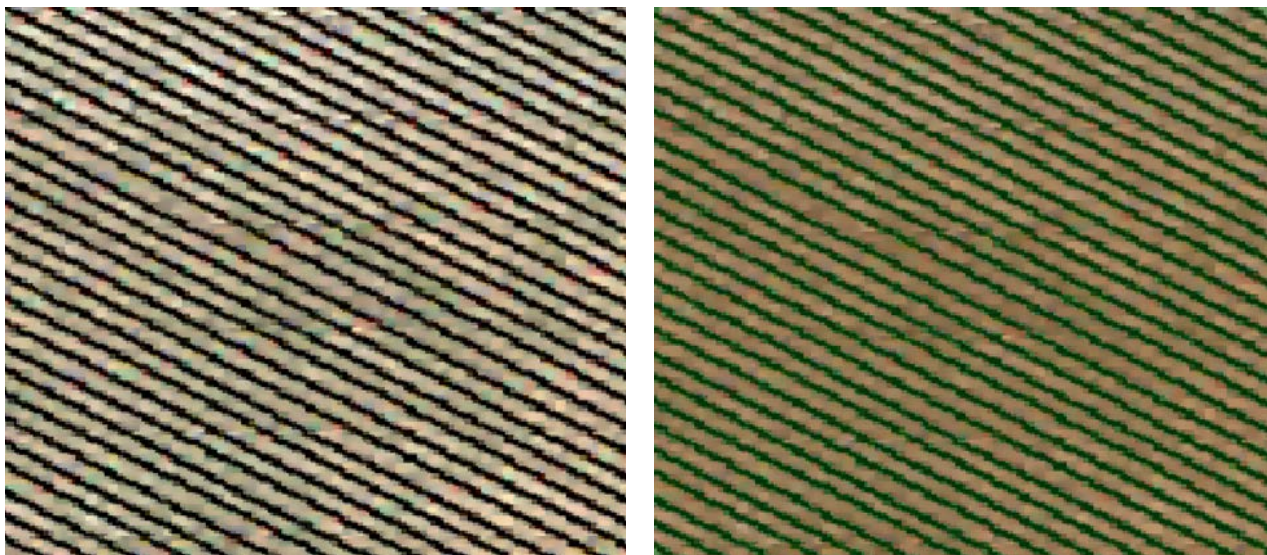
Η ποσοτική αξιολόγηση κατέδειξε ότι η ταξινόμηση είναι ικανοποιητική και για τις δύο κατηγορίες, με τις τιμές της Ολικής Ακρίβειας και του δείκτη kappa να παραμένουν αμείωτες. Παρακάτω παρατίθεται ο Πίνακας Σύγχυσης της ταξινόμησης.

	ΑΜΠΕΛΙ	ΕΔΑΦΟΣ	ΑΘΡΟΙΣΜΑ	P.A.
ΑΜΠΕΛΙ	25198.0	151.0	25349.0	0.99
ΕΔΑΦΟΣ	98.0	9652.0	9750.0	0.99
ΑΘΡΟΙΣΜΑ	25296.0	9803.0	kappa:	0.98
U.A.	0.99	0.98	O.A.:	0.99

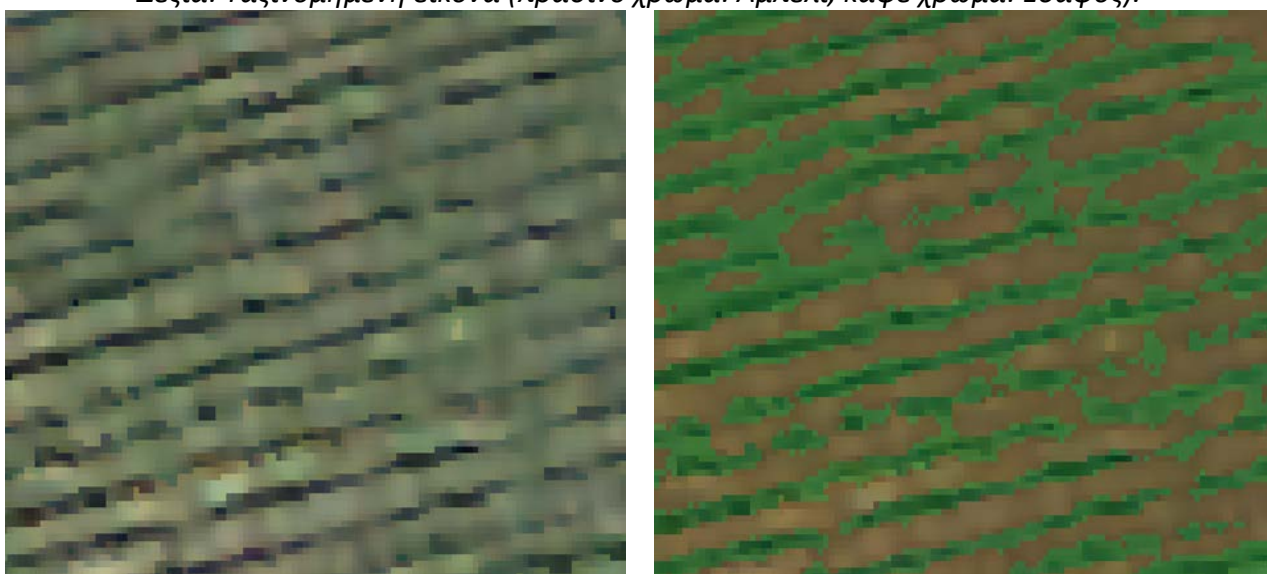
Πίνακας 4.51. Πίνακας Σύγχυσης για πείραμα με ratio = 20% στην περιοχή της Νάουσας 2.

Πείραμα 5 (ratio = 10%)

Στο πέμπτο πείραμα χρησιμοποιήθηκε το 10% των δεδομένων ελέγχου για την εκπαίδευση του ταξινομητή και το 90% για την αξιολόγησή του. Ποιοτικά, η ταξινόμηση κρίνεται επιτυχής για το μεγαλύτερο μέρος της εικόνας, με κάποιες περιορισμένες αστοχίες όμοιες με αυτές των προηγούμενων πειραμάτων. Παρακάτω παρουσιάζονται κάποια ενδεικτικά στιγμιότυπα.



Εικόνα 4.104. Επιτυχής ταξινόμηση. Αριστερά: Πολυφασματική δορυφορική εικόνα (RGB). Δεξιά: Ταξινομημένη εικόνα (πράσινο χρώμα: Αμπέλι, καφέ χρώμα: Έδαφος).



Εικόνα 4.105. Άστοχη ταξινόμηση. Αριστερά: Πολυφασματική δορυφορική εικόνα (RGB). Δεξιά: Ταξινομημένη εικόνα (πράσινο χρώμα: Αμπέλι, καφέ χρώμα: Έδαφος).

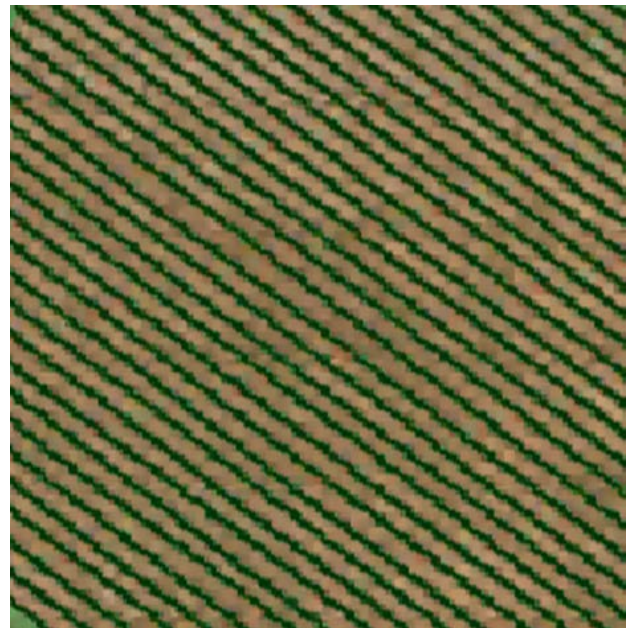
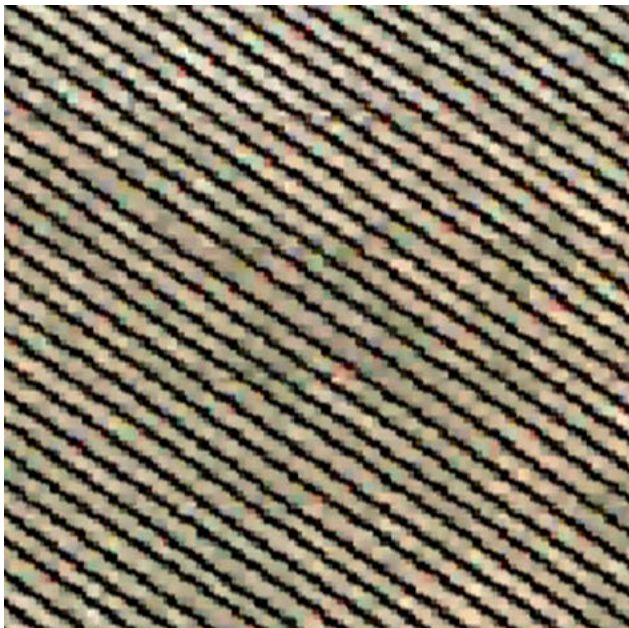
Και σε αυτό το πείραμα, οι τιμές των μέτρων ποσοτικής αξιολόγησης δε μεταβλήθηκαν. Επομένως, η κλιμακούμενη μείωση των δεδομένων εκπαίδευσης δεν επηρέασε την αποτελεσματικότητα του ταξινομητή. Παρακάτω παρατίθεται ο Πίνακας Σύγκρισης για το παρόν πείραμα.

	ΑΜΠΕΛΙ	ΕΔΑΦΟΣ	ΑΘΡΟΙΣΜΑ	P.A.
ΑΜΠΕΛΙ	28258.0	113.0	28371.0	0.99
ΕΔΑΦΟΣ	200.0	10915.0	11115.0	0.98
ΑΘΡΟΙΣΜΑ	28458.0	11028.0	κappa:	0.98
U.A.	0.99	0.99	O.A.:	0.99

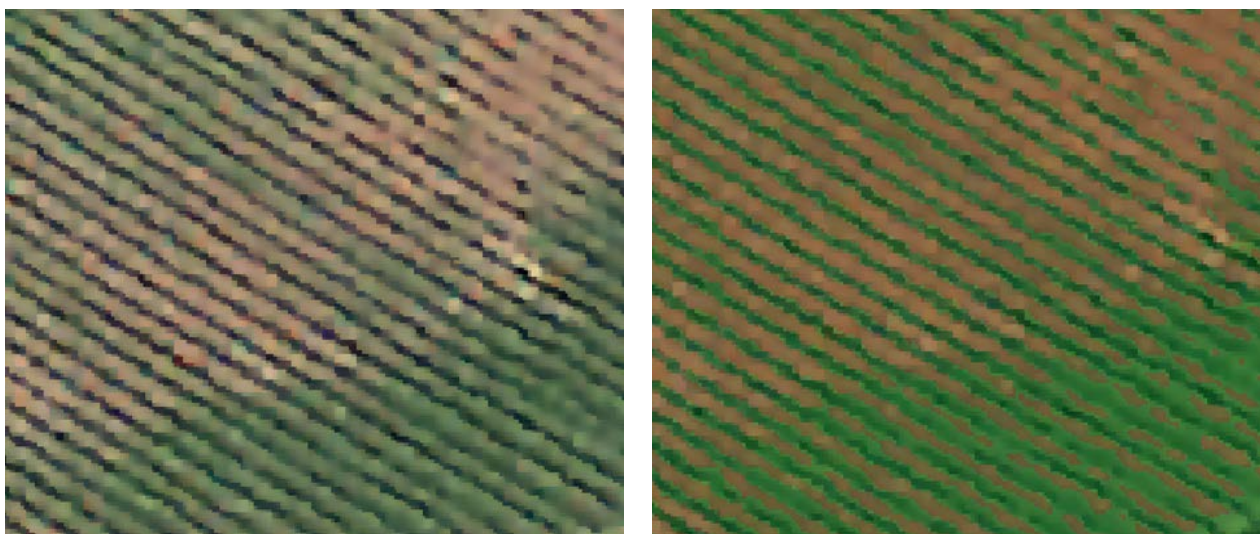
Πίνακας 4.52. Πίνακας Σύγχυσης για πείραμα με ratio = 10% στην περιοχή της Νάουσας 2.

Πείραμα 6 (ratio = 5%)

Λόγω της σταθερότητας του ταξινομητή στη μείωση των δεδομένων εκπαίδευσης και της ικανοποιητικής αποτελεσματικότητάς του, αποφασίστηκε να υλοποιηθεί ακόμα ένα πείραμα με χαμηλότερο ποσοστό δεδομένων εκπαίδευσης. Επομένως, χρησιμοποιήθηκε το 5% των δεδομένων ελέγχου για την εκπαίδευση του αλγορίθμου και το 95% για την αξιολόγησή του. Το αποτέλεσμα της ταξινόμησης είναι ικανοποιητικό, με κάποιες αστοχίες να διατηρούνται όπως και στα προηγούμενα πειράματα. Παρακάτω παρουσιάζονται ορισμένα χαρακτηριστικά στιγμιότυπα της ταξινόμησης.



Εικόνα 4.106. Επιτυχής ταξινόμηση. Αριστερά: Πολυφασματική δορυφορική εικόνα (RGB). Δεξιά: Ταξινομημένη εικόνα (πράσινο χρώμα: Αμπέλι, καφέ χρώμα: Έδαφος).



Εικόνα 4.107. Άστοχη ταξινόμηση. Αριστερά: Πολυφασματική δορυφορική εικόνα (RGB). Δεξιά: Ταξινομημένη εικόνα (πράσινο χρώμα: Αμπέλι, καφέ χρώμα: Έδαφος).

Η ποσοτική αξιολόγηση καταδεικνύει ότι είναι επιτυχής η ταξινόμηση, με την Ολική Ακρίβεια και το δείκτη kappa να παραμένουν αμείωτοι, παρ' όλο που μειώθηκε το σύνολο των δεδομένων εκπαίδευσης. Παρακάτω παρατίθεται ο Πίνακας Σύγχυσης της ταξινόμησης.

	ΑΜΠΕΛΙ	ΕΔΑΦΟΣ	ΑΘΡΟΙΣΜΑ	P.A.
ΑΜΠΕΛΙ	28258.0	113.0	28371.0	0.99
ΕΔΑΦΟΣ	200.0	10915.0	11115.0	0.98
ΑΘΡΟΙΣΜΑ	28458.0	11028.0	kappa:	0.98
U.A.	0.99	0.99	O.A.:	0.99

Πίνακας 4.53. Πίνακας Σύγχυσης για πείραμα με ratio = 5% στην περιοχή της Νάουσας 2.

Η ταξινόμηση που προέκυψε για την περιοχή μελέτης της Νάουσας 2 μέσω των παραπάνω πειραμάτων παρουσιάζεται για μία υποπεριοχή της εικόνας, ώστε να είναι εμφανής ο εντοπισμός του φυλλώματος στην εικόνα.



Εικόνα 4.108. Αποτέλεσμα ταξινόμησης στην περιοχή μελέτης της Νάουσας 2 (πράσινο χρώμα: φύλλωμα).

Για τη συγκριτική αξιολόγηση των έξι πειραμάτων για την περιοχή μελέτης της Νάουσας 2 παρουσιάζονται συγκεντρωτικά τα ποσοτικά τους μέτρα αξιολόγησης.

	Ratio (training – validation)					
	5% - 95%	10% - 90%	20% - 80%	30% - 70%	40% - 60%	50% - 50%
O.A.	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99
kappa	0.98	0.98	0.98	0.98	0.98	0.98
U.A. (average)	0.98	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99
P.A. (average)	0.98	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99
F1-score	0.98	0.98	0.98	0.98	0.98	0.98

Πίνακας 4.54. Πίνακας Συνολικών Ποσοτικών Αποτελεσμάτων για τα πειράματα στην περιοχή της Νάουσας 2.

Από τα συγκεντρωτικά ποσοτικά αποτελέσματα προκύπτει το συμπέρασμα ότι η ταξινόμηση για την εικόνα της Νάουσας 2 δεν επηρεάζεται από την κλιμακούμενη μείωση των δεδομένων εκπαίδευσης στα πειράματα. Η σταθερότητα του ταξινομητή δικαιολογείται από τις σταθερές τιμές της Ολικής Ακρίβειας και του δείκτη kappa. Επομένως, τα δεδομένα ελέγχου που είχαν συλλεχθεί για τη συγκεκριμένη περιοχή μελέτης ήταν αντιπροσωπευτικά και για τις δύο κατηγορίες και η ταξινόμηση της εικόνας θεωρείται επιτυχής.

4.1.2 Συνολική Αξιολόγηση Πειραμάτων Ανά Περιοχή

Για τη συνολική αξιολόγηση της πρώτης φάσης πειραμάτων, όπου ο αλγόριθμος εκπαιδεύτηκε με τα δεδομένα ελέγχου της υπό ταξινόμηση περιοχής, και για να γίνει μία σύγκριση ανάμεσα σε όλες τις περιοχές μελέτης παρατίθεται ένας πίνακας συγκεντρωτικών αποτελεσμάτων. Στον πίνακα περιλαμβάνεται η μέση τιμή των τριών βασικών μέτρων αξιολόγησης, όπως αυτή προκύπτει από το μέσο όρο των αντίστοιχων τιμών των πειραμάτων κάθε περιοχής.

ΠΕΡΙΟΧΗ ΜΕΛΕΤΗΣ	ΠΟΣΟΤΙΚΑ ΜΕΤΡΑ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗΣ		
	O. A. (average)	kappa (average)	F1-score (average)
Αμύνταιο	0.99	0.98	0.98
Κρήτη	0.98	0.85	0.98
Δράμα	0.99	0.98	0.98
Επανομή	0.98	0.86	0.98
Καλή Βρύση	0.99	0.94	0.98
Μαντινεία	0.99	0.99	0.98
Νάουσα 1	0.99	0.97	0.98
Νάουσα 2	0.99	0.98	0.98

Πίνακας 4.55. Πίνακας Συνολικών Ποσοτικών Αποτελεσμάτων για τα πειράματα σε όλες τις περιοχές μελέτης.

Από τα συγκεντρωτικά ποσοτικά αποτελέσματα για όλες τις περιοχές μελέτης παρατηρείται μία σταθερότητα στις τιμές της Ολικής Ακρίβειας, γεγονός που αποδεικνύει τη «στιβαρότητα» (robustness) του ταξινομητή στις αλλαγές του ποσοστού των δεδομένων εκπαίδευσης. Επομένως, τα δεδομένα ελέγχου που συλλέχθηκαν για κάθε περιοχή ήταν αντιπροσωπευτικά για τις κατηγορίες Αμπέλι και Έδαφος. Βέβαια, η σταθερή τιμή του μέτρου F1-score καταδεικνύει τη μεροληψία της ταξινόμησης υπέρ της κατηγορίας Αμπέλι, γιατί είναι αριθμητικά περισσότερα τα δεδομένα ελέγχου για αυτή την κατηγορία σε σχέση με την κατηγορία Έδαφος. Το μέτρο F1-score λαμβάνει υπόψη τα True Positives σε συνδυασμό με τα False Positives και τα False Negatives και όπως είναι φανερό από τις υψηλές τιμές, τα True Positives υπερέρχουν αριθμητικά των άλλων δύο κατηγοριών.

Επιπλέον, ο δείκτης kappa έχει μία διακύμανση ανάμεσα στις περιοχές, που οφείλεται στο πλήθος των σφαλμάτων που κατάφερε να αποφύγει ο ταξινομητής. Στις περιοχές της Κρήτης και της Επανομής έχει τις χαμηλότερες τιμές, καθώς σε αυτές τις δύο περιοχές υπήρχαν πολλά απεριποίητα αμπελοτεμάχια στα οποία οι φασματικές υπογραφές αμπελιού-εδάφους ήταν παρόμοιες και το έδαφος μπερδευόταν ανάμεσα στις γραμμές πρέμνων. Αυτό είχε σαν αποτέλεσμα να δυσχεραίνεται ο διαχωρισμός.

Συνολικά, η ταξινόμηση που υλοποιήθηκε στις δορυφορικές εικόνες με τον ταξινομητή Random Forest για τον εντοπισμό του φυλλώματος των αμπελιών και το

διαχωρισμό του από το έδαφος, ανά περιοχή μελέτης θεωρείται επιτυχής. Είναι αξιοσημείωτο ότι ο ταξινομητής Random Forest κατάφερε να εντοπίσει το φύλλωμα των αμπελιών σε μεγάλο εύρος περιοχών, που χαρακτηρίζονται από φασματική ανομοιογένεια λόγω των διαφορετικών εδαφοκλιματικών συνθηκών και καλύπτουν διαφορετικές οινοπαραγωγικές ζώνες στη βόρεια, την κεντρική και τη νότια Ελλάδα.

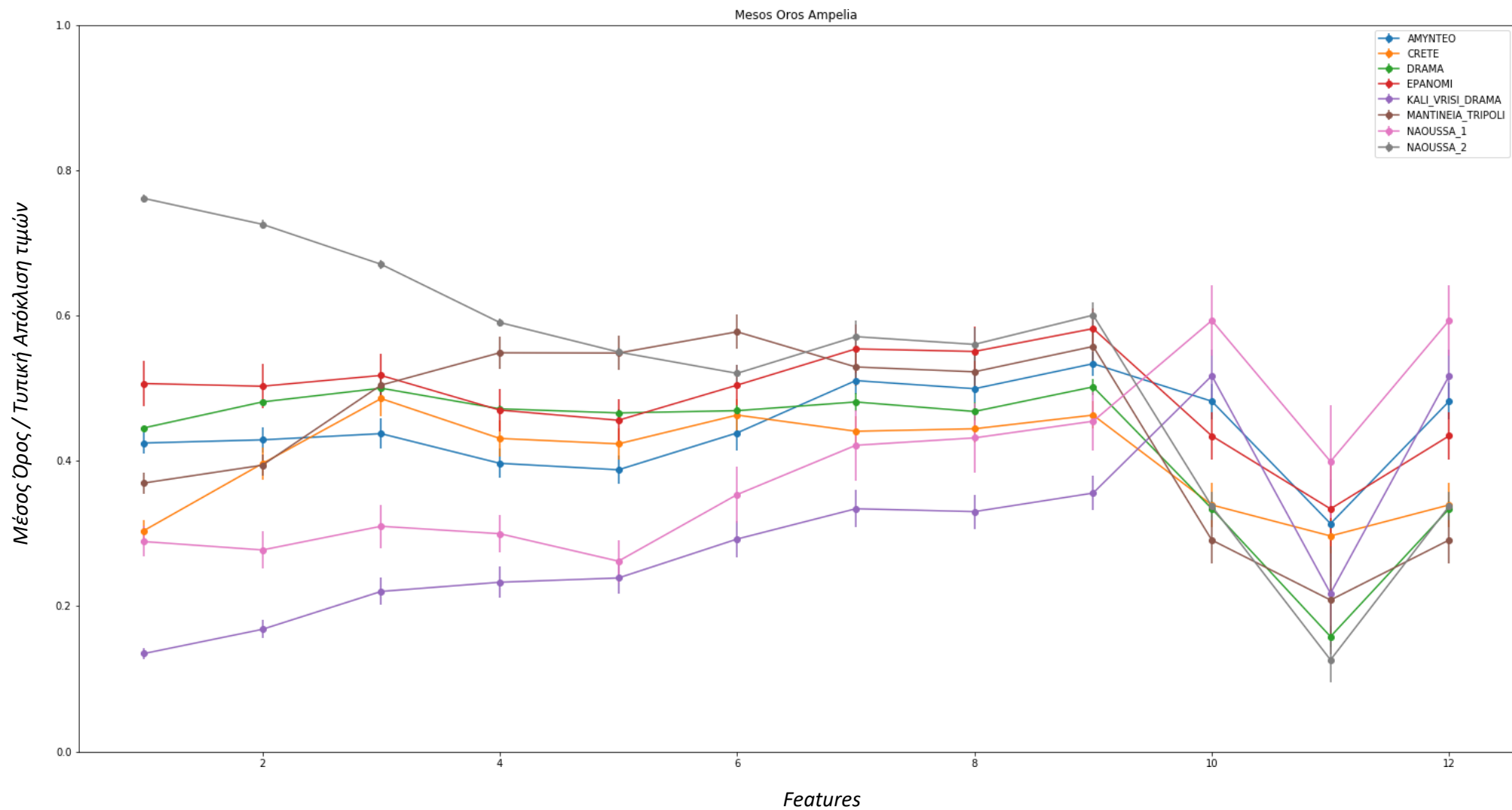
4.2 Πειράματα Ταξινόμησης με Συνδυασμό Περιοχών

Στη συνέχεια της πειραματικής διαδικασίας, υλοποιήθηκαν πειράματα με τον ταξινομητή Random Forest, κατά τα οποία χρησιμοποιήθηκαν δεδομένα ελέγχου από πολλές εικόνες για την εκπαίδευση του αλγορίθμου και η ταξινόμηση εφαρμόστηκε επίσης σε περισσότερες από μία εικόνες. Σε κάποια πειράματα, οι εικόνες που συμμετείχαν στην εκπαίδευση λάμβαναν μέρος και στην ταξινόμηση και στην αξιολόγησή της, ενώ σε κάποια άλλα η εκπαίδευση και η αξιολόγηση γινόταν σε ανεξάρτητα δεδομένα εικόνων. Στόχος αυτών των πειραμάτων ήταν να διαπιστωθεί αν χρησιμοποιώντας δεδομένα ελέγχου μίας περιοχής για την εκπαίδευση του ταξινομητή υπάρχει η δυνατότητα να γίνει πρόβλεψη της ταξινόμησης μίας άλλης περιοχής. Επιπλέον, εξετάστηκε αν εκπαιδεύοντας τον αλγόριθμο με δεδομένα ελέγχου πολλών περιοχών, βελτιωνόταν η πρόβλεψη στις υπό ταξινόμηση περιοχές.

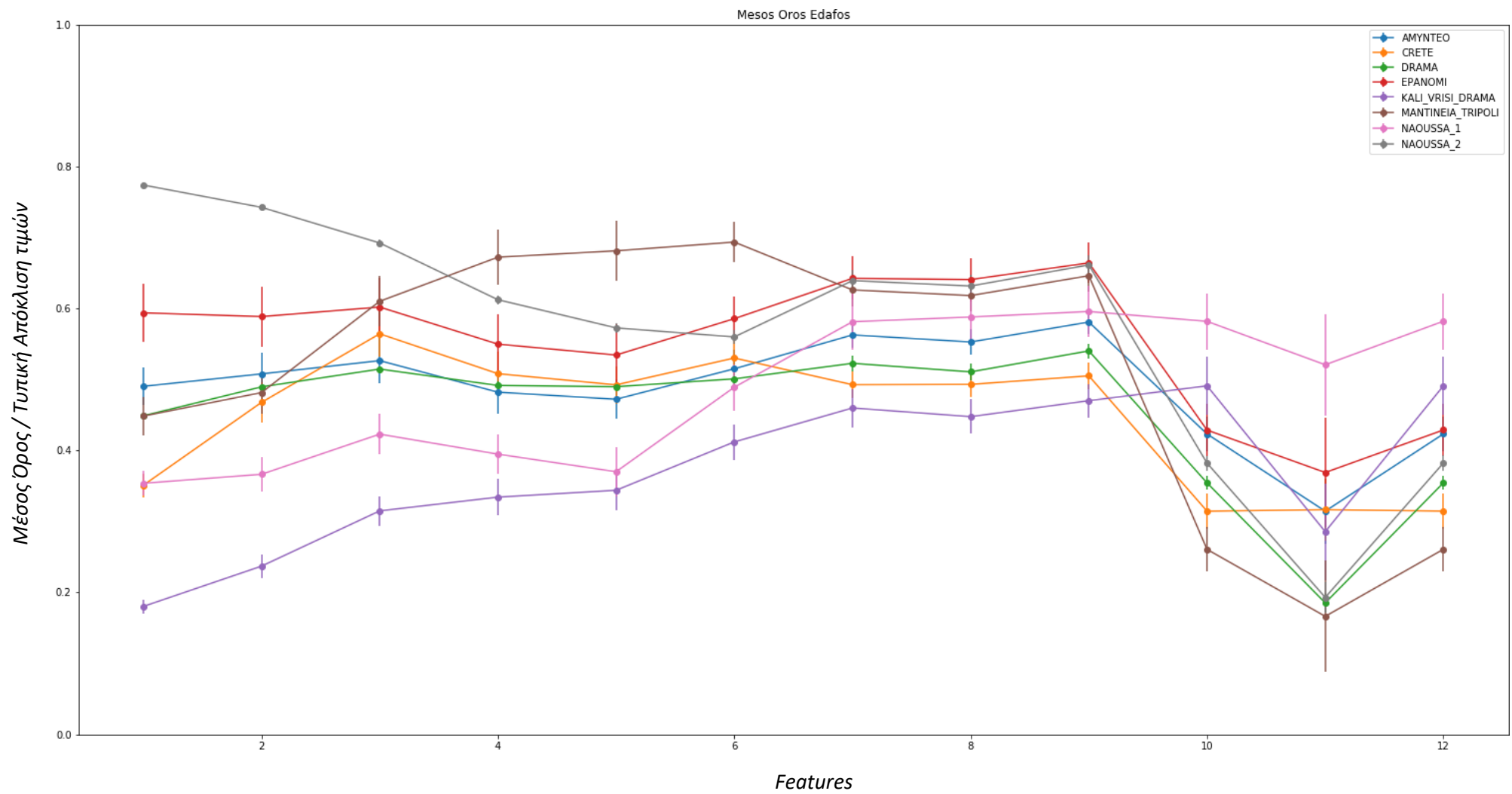
Για την ορθότερη και πιο αποτελεσματική επιλογή των περιοχών που θα συμμετείχαν στα πειράματα, τόσο στην εκπαίδευση όσο και στην πρόβλεψη της ταξινόμησης, υπολογίστηκαν κάποια διαγράμματα. Τα διαγράμματα αυτά είναι τρία και απεικονίζουν τη φασματική συμπεριφορά κάθε περιοχής μελέτης στα οκτώ κανάλια της πολυφασματικής εικόνας, καθώς και τις τιμές που καταλαμβάνουν τα εικονοστοιχεία στο χαρακτηριστικό της Υφής Gabor και στους δείκτες NDVI, TCARI, MSAVI, OSAVI.

Πιο συγκεκριμένα, με χρήση της γλώσσας προγραμματισμού Python υπολογίστηκε ένα διάγραμμα που απεικονίζει τη φασματική συμπεριφορά των Αμπελιών, ένα διάγραμμα που απεικονίζει τη φασματική συμπεριφορά του Εδάφους και ένα διάγραμμα που απεικονίζει τη διαφορά των δύο προηγούμενων διαγραμμάτων, για να γίνει η σύγκριση μεταξύ των δύο κατηγοριών σε κάθε εικόνα. Για να απεικονιστούν οι καμπύλες όλων των περιοχών μελέτης στο εκάστοτε διάγραμμα, υπολογίστηκε ο μέσος όρος και η τυπική απόκλιση των τιμών των εικονοστοιχείων για καθένα από τα πολυφασματικά κανάλια, για το χαρακτηριστικό Υφής Gabor και για τους δείκτες NDVI, TCARI, MSAVI, OSAVI. Να σημειωθεί ότι οι τιμές όλων των παραπάνω χαρακτηριστικών (features) δεν είχαν κανονικοποιηθεί στο διάστημα [0, 1].

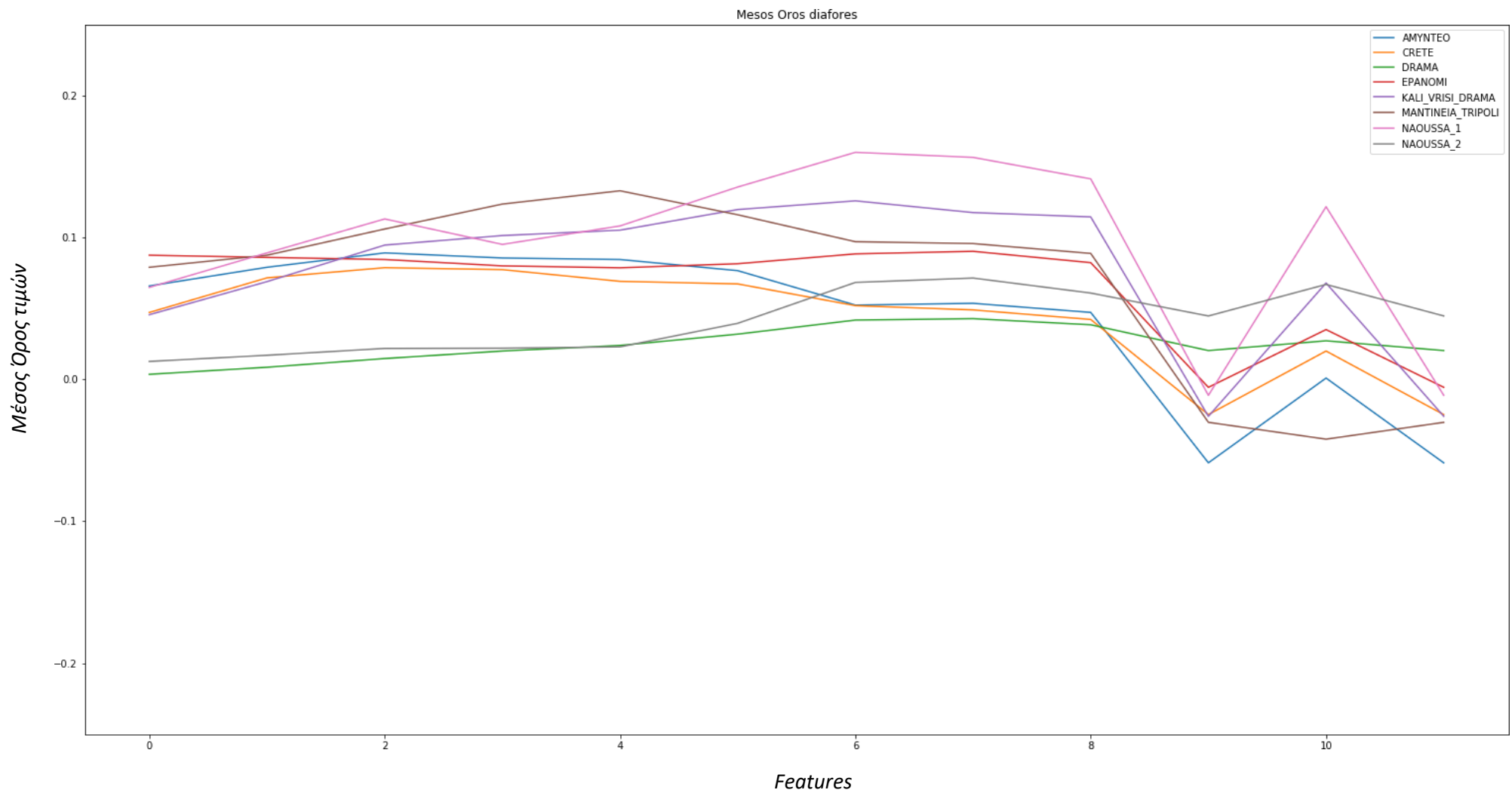
Σκοπός ήταν η μοντελοποίηση κάθε εικόνας για καθεμία από τις δύο κατηγορίες ταξινόμησης (Αμπέλι, Όχι Αμπέλι), έτσι ώστε να διαπιστωθεί ποιοι συνδυασμοί εικόνων θα ήταν πιο αποτελεσματικοί αν συνδυάζονταν για την ταξινόμηση. Μετά τη δημιουργία των διαγραμμάτων, διαπιστώθηκε ότι ο δείκτης MSAVI κατείχε και αρνητικές τιμές σε όλες τις περιοχές μελέτης. Επομένως, κρίθηκε ότι δυσχεραίνει τη συγκριτική αξιολόγηση της φασματικής συμπεριφοράς των περιοχών και αφαιρέθηκε από όλα τα διαγράμματα. Συνολικά, χρησιμοποιήθηκαν 12 features για την απεικόνιση των διαγραμμάτων (άξονας Χ). Τέλος, για την ορθότερη σύγκριση των καμπυλών των διαφορετικών εικόνων έγινε μία ανακατανομή των τιμών των εικονοστοιχείων και των παραγώγων τους (Μέσος Όρος, Τυπική Απόκλιση) στο διάστημα τιμών [0, 1] για τα δύο πρώτα διαγράμματα και στο διάστημα [-0,25, 0,25] για το διάγραμμα των διαφορών (άξονας Υ). Παρακάτω παρουσιάζονται τα τρία διαγράμματα και γίνεται η συγκριτική αξιολόγηση των περιοχών μελέτης.



Εικόνα 4.109. Διάγραμμα φασματικής συμπεριφοράς Αμπελιών για κάθε περιοχή μελέτης για τα 12 features.



Εικόνα 4.110. Διάγραμμα φασματικής συμπεριφοράς Εδάφους για κάθε περιοχή μελέτης για τα 12 features.



Εικόνα 4.111. Διάγραμμα διαφοράς φασματικής συμπεριφοράς Αμπελιών-φασματικής συμπεριφοράς Εδάφους για κάθε περιοχή μελέτης.

Από την παρατήρηση των παραπάνω διαγραμμάτων προκύπτουν τα εξής συμπεράσματα:

1. Οι περιοχές της Επανομής και της Νάουσας 2 παρουσιάζουν υψηλές τιμές στα κανάλια 1, 2, 3 (Coastal Blue, Blue, Green), τόσο στα αμπέλια όσο και στο έδαφος (Εικόνες 4.93, 4.94). Αυτό το χαρακτηριστικό ξεχωρίζει τις καμπύλες τους από αυτές των υπόλοιπων περιοχών, δημιουργώντας αυτόματα μία αντίθεση μεταξύ τους που ίσως φανεί χρήσιμη στην επιλογή των περιοχών μελέτης για τα ακόλουθα πειράματα.
2. Αντίθεση επίσης εντοπίζεται και μεταξύ των περιοχών του Αμυνταίου και της Καλής Βρύσης, καθώς οι καμπύλες τους είναι σχεδόν παράλληλες για τα φασματικά κανάλια και το χαρακτηριστικό της Υφής, με την καμπύλη του Αμυνταίου να έχει υψηλότερες τιμές σε όλα τα features από την καμπύλη της Καλής Βρύσης. Η αντίθεση αυτή ισχύει για τα αμπέλια και για το έδαφος των δύο περιοχών (Εικόνες 4.93, 4.94).
3. Τα αμπέλια (Εικόνα 4.93) και το έδαφος (Εικόνα 4.94) στην περιοχή μελέτης της Κρήτης εμφανίζουν διαφορετική φασματική συμπεριφορά, όπως φαίνεται από τις διαφορετικές τους καμπύλες για όλα τα features. Επομένως, γίνεται αντιληπτό ότι τα αμπέλια και το έδαφος στην περιοχή μελέτης της Κρήτης θα είναι εύκολα διαχωρίσιμα κατά την ταξινόμηση.
4. Ομοίως με την Κρήτη, και οι περιοχές της Καλής Βρύσης και της Νάουσας 1 παρουσιάζουν αντίθεση στη φασματική συμπεριφορά αμπελιών και εδάφους (Εικόνες 4.93, 4.94). Στις δύο αυτές περιπτώσεις όμως αυτό το χαρακτηριστικό δικαιολογείται από τη μορφή ολόκληρης της καμπύλης κάθε περιοχής, συμπεριλαμβανομένων και των δεικτών βλάστησης.
5. Σε όλες τις περιοχές μελέτης, το Έδαφος (Εικόνα 4.94) έχει υψηλότερες τιμές στα κανάλια, στην υφή και στους δείκτες. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι το έδαφος είναι αρκετά φωτεινό σε σχέση με τα αμπέλια και ότι λόγω των προεπεξεργασιών στις οποίες υποβλήθηκαν οι εικόνες το εύρος των τιμών των αμπελιών μετατοπίστηκε αρκετά χαμηλά.
6. Για την περιοχή της Κρήτης παρατηρείται ότι στο Έδαφος (Εικόνα 4.94) οι δείκτες βλάστησης έχουν τον ίδιο μέσο όρο τιμής. Επομένως, οι δείκτες βλάστησης δε βοηθούν στην ταξινόμηση των εικονοστοιχείων του εδάφους για τη συγκεκριμένη περιοχή.
7. Σχετικά με το δείκτη βλάστησης NDVI και τη συμβολή του στην ταξινόμηση των εικόνων, παρατηρείται ότι στις περιοχές της Καλής Βρύσης και της Νάουσας 1 οι τιμές του NDVI (δέκατο feature) αυξάνονται κατακόρυφα σε σχέση με τη φασματική απόκριση των εικονοστοιχείων στα κανάλια. Αντίθετα, σε όλες τις υπόλοιπες περιοχές μελέτης οι τιμές του NDVI μειώθηκαν συγκριτικά με τις τιμές των φασματικών καναλιών. Αυτό το χαρακτηριστικό για το δείκτη NDVI ισχύει και για το Αμπέλι και για το Έδαφος (Εικόνες 4.93, 4.94).

8. Από το Διάγραμμα των διαφορών (Εικόνα 4.95) είναι εμφανές ότι η περιοχή μελέτης της Δράμας δεν εμφανίζει κάποια αξιοσημείωτη διαφορά στη φασματική συμπεριφορά των αμπελιών και του εδάφους, καθώς η καμπύλη της διαφοράς είναι σχεδόν ευθεία και ίση με μηδέν. Επομένως, συμπεραίνεται ότι τα αμπέλια και το έδαφος της περιοχής μοιάζουν φασματικά και δε διαχωρίζονται εύκολα. Άρα δε θα είναι πολύ χρήσιμα τα δεδομένα της περιοχής κατά την ταξινόμηση.
9. Από την παρατήρηση του Διαγράμματος των διαφορών (Εικόνα 4.95) παρατηρούνται τρεις κατηγορίες εικόνων:
- α) οι περιοχές Νάουσα 1, Καλή Βρύση και Μαντινεία παρουσιάζουν τις μεγαλύτερες διαφορές στη φασματική απόκριση Αμπελιού και Εδάφους,
 - β) οι περιοχές Αμύνταιο, Κρήτη και Επανομή παρουσιάζουν μέτριες διαφορές στη φασματική συμπεριφορά Αμπελιού και Εδάφους και
 - γ) οι περιοχές Δράμα και Νάουσα 2 εμφανίζουν ελάχιστες διαφορές στη φασματική απόκριση των δύο κατηγοριών.
10. Στο Διάγραμμα των διαφορών (Εικόνα 4.95) είναι εμφανές ότι οι καμπύλες του Αμυνταίου και της Μαντινείας είναι σχεδόν παράλληλες μέχρι το ένατο feature (NDVI). Επομένως, διαπιστώνεται παρόμοια φασματική συμπεριφορά στις δύο κατηγορίες ταξινόμησης για αυτές τις δύο περιοχές.

Από τα παραπάνω συμπεράσματα καθίσταται σαφές ότι κάθε περιοχή μελέτης διακρίνεται από κάποια χαρακτηριστικά γνωρίσματα που μπορούν να συμβάλλουν στην ταξινόμηση εικόνων, χρησιμοποιώντας δεδομένα ελέγχου από πολλές διαφορετικές περιοχές. Επιπλέον, λαμβάνοντας υπόψη τα συγκεκριμένα χαρακτηριστικά κάθε εικόνας κατά την επιλογή των περιοχών που θα συμμετέχουν στα συνδυαστικά πειράματα, στοχεύεται η βελτίωση της ταξινόμησης των εικονοστοιχείων στις κατηγορίες Αμπέλι και Έδαφος.

4.2.1 Πειράματα με χρήση του συνόλου των δεδομένων ελέγχου (άνισο μέγεθος δειγμάτων)

Στα πρώτα πειράματα που υλοποιήθηκαν με συνδυασμό εικόνων, για την εκπαίδευση του ταξινομητή επιλέχθηκε να χρησιμοποιηθεί το σύνολο των δεδομένων ελέγχου που είχαν συλλεχθεί για κάθε εικόνα. Κατ' αυτό τον τρόπο, δημιουργείται ένα μεγαλύτερο σύνολο που περιλαμβάνει όλα τα δεδομένα ελέγχου των εικόνων που παίρνουν μέρος στην εκπαίδευση του ταξινομητή. Από αυτό το μεγαλύτερο σύνολο επιλέγεται το 10%, δηλαδή δημιουργείται ένα τυχαίο υποσύνολο με βάση το οποίο γίνεται η εκπαίδευση του αλγορίθμου και το υπόλοιπο 90% χρησιμοποιείται για την αξιολόγηση της εκπαίδευσης.

Με αυτό τον τρόπο εκπαίδευσης υλοποιήθηκε μία σειρά πειραμάτων, με διαφορετικό συνδυασμό περιοχών μελέτης για την εκπαίδευση και την ταξινόμηση.

Από αυτά παρουσιάζονται τα δύο πειράματα που απέδωσαν τα πιο ικανοποιητικά αποτελέσματα.

Για την ονοματολογία που θα ακολουθηθεί στην περιγραφή των πειραμάτων παρατίθεται ο παρακάτω πίνακας.

ΠΕΡΙΟΧΗ	ΣΥΝΤΟΜΟΓΡΑΦΙΑ
Αμύνταιο	A
Κρήτη	C
Δράμα	D
Επανομή	E
Καλή Βρύση	K
Μαντινεία	M
Νάουσα 1	N1
Νάουσα 2	N2

Πίνακας 4.56. Πίνακας Συντομογραφιών για τις περιοχές μελέτης.

Πείραμα 1

Στο πρώτο συνδυαστικό πείραμα χρησιμοποιήθηκαν κάποιες περιοχές μελέτης με διαφορετικά χαρακτηριστικά, οι οποίες επιλέχθηκαν με κριτήριο το μέγεθος της εικόνας. Δηλαδή επιλέχθηκαν οι εικόνες με τις μικρότερες διαστάσεις για την εκπαίδευση, για να γίνει η ταξινόμηση στις μεγαλύτερες εικόνες. Πιο συγκεκριμένα, επιλέχθηκαν οι περιοχές Κρήτη, Επανομή, Καλή Βρύση και Νάουσα 1 για την εκπαίδευση του αλγορίθμου. Για την πρόβλεψη της ταξινόμησης χρησιμοποιήθηκαν οι υπόλοιπες τέσσερις περιοχές μελέτης (Αμύνταιο, Δράμα, Μαντινεία, Νάουσα 2).

TRAIN	PREDICTION
C	A
E	D
K	M
N1	N2

Πίνακας 4.57. Περιοχές εκπαίδευσης και πρόβλεψης ταξινόμησης για το Πείραμα 1.

Ο Πίνακας Σύγχυσης που υπολογίστηκε για την εκπαίδευση του ταξινομητή κατέδειξε ότι η εκπαίδευση ήταν αποτελεσματική, με την Ολική Ακρίβεια να φτάνει στο 99% και το δείκτη kappa να ισούται με 0,89. Επιπλέον, παρατηρείται ότι τα μέτρα της Ακρίβειας του Χρήστη (U.A.) και της Ακρίβειας του Παραγωγού (P.A.) έχουν μεγαλύτερες τιμές για την κατηγορία Αμπέλι από ότι για την κατηγορία Έδαφος. Επομένως, είναι προφανές ότι ο ταξινομητής έχει εκπαιδευτεί καλύτερα για την κατηγορία Αμπέλι. Ο Πίνακας Σύγχυσης της εκπαίδευσης παρατίθεται παρακάτω.

	ΑΜΠΕΛΙ	ΕΔΑΦΟΣ	ΑΘΡΟΙΣΜΑ	P.A.
ΑΜΠΕΛΙ	434147.0	2962.0	437109.0	0.99
ΕΔΑΦΟΣ	1757.0	21234.0	22991.0	0.92
ΑΘΡΟΙΣΜΑ	435904.0	24196.0	kappa:	0.89
U.A.	0.99	0.88	O.A.:	0.99

Πίνακας 4.58. Πίνακας Σύγχυσης της εκπαίδευσης του Πειράματος 1.

Στη συνέχεια, έγινε η πρόβλεψη της ταξινόμησης με τον ταξινομητή Random Forest ανεξάρτητα για κάθε εικόνα.

Αμύνταιο

Στην περιοχή του Αμυνταίου η ταξινόμηση που προέκυψε δεν ήταν ικανοποιητική, καθώς πολλά αμπελοτεμάχια ταξινομήθηκαν ολόκληρα ως Αμπέλια, δηλαδή ο ταξινομητής δεν εντόπισε καθόλου τα εικονοστοιχεία του Εδάφους στα σημεία αυτά. Στα αμπελοτεμάχια που έγινε πιο ολοκληρωμένη ταξινόμηση, το αποτέλεσμα ήταν ημιτελές καθώς σε πολλά σημεία μπερδεύτηκαν οι γραμμές πρέμνων και ενδιάμεσου εδάφους και ταξινομήθηκε ξανά το έδαφος ως αμπέλι. Επιπρόσθετα, σε πολλά αμπελοτεμάχια ταξινομήθηκαν λανθασμένα και τα αμπέλια ως Έδαφος (Εικόνα 4.96). Η σύγχυση αυτή προήλθε από την ομοιότητα των φασματικών υπογραφών των δύο κατηγοριών. Η ομοιότητα αυτή οφείλεται στην ενδιάμεση βλάστηση που υπάρχει μεταξύ των γραμμών των πρέμνων και στον τύπο του εδάφους, που είναι αρκετά σκουρόχρωμο και μοιάζει με τον τόνο του χρώματος των φύλλων των αμπελιών. Παρακάτω παρουσιάζεται ένα χαρακτηριστικό απόσπασμα αστοχίας της ταξινόμησης.



Εικόνα 4.112. Αστοχία ταξινόμησης στην περιοχή του Αμυνταίου (πράσινο χρώμα: Αμπέλι, καφέ χρώμα: Έδαφος).

Ο Πίνακας Σύγχυσης της ταξινόμησης αιτιολογεί με τις τιμές των ποσοτικών μέτρων την κακή απόδοση του ταξινομητή, καθώς η Ολική Ακρίβεια φτάνει μόλις το 71%. Επιπλέον, η Ακρίβεια του Χρήστη (U.A.) και η Ακρίβεια του Παραγωγού (P.A.) για την κατηγορία Έδαφος ισούνται με μηδέν, καθώς ο αλγόριθμος ταξινόμησε σωστά μόνο 35 εικονοστοιχεία εδάφους στην κατηγορία Έδαφος. Παρακάτω παρατίθεται ο Πίνακας Σύγχυσης.

	ΑΜΠΕΛΙ	ΕΔΑΦΟΣ	ΑΘΡΟΙΣΜΑ	P.A.
ΑΜΠΕΛΙ	81188.0	20578.0	101766.0	0.8
ΕΔΑΦΟΣ	12255.0	35.0	12290.0	0.0
ΑΘΡΟΙΣΜΑ	93443.0	20613.0	kappa:	-0.15
U.A.	0.87	0.0	O.A.:	0.71

Πίνακας 4.59. Πίνακας Σύγχυσης της ταξινόμησης της περιοχής του Αμυνταίου στο Πείραμα 1.

Δράμα

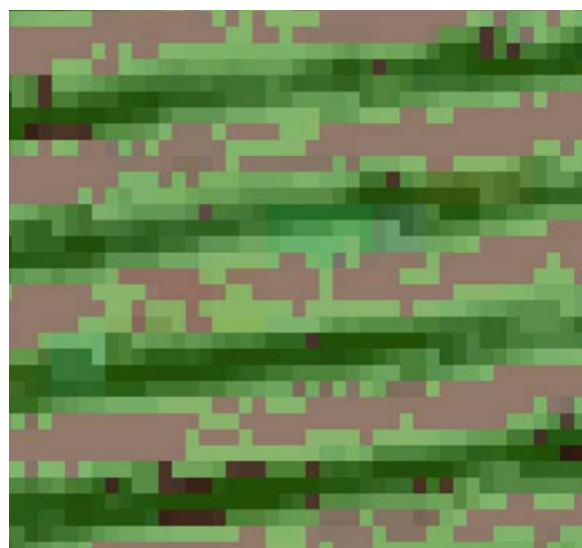
Η ταξινόμηση στην περιοχή μελέτης της Δράμας ήταν εξίσου αναποτελεσματική. Ο ταξινομητής απέτυχε να εντοπίσει τα εικονοστοιχεία του εδάφους και να τα κατηγοριοποιήσει στη σωστή κλάση σε όλη την εικόνα. Όπως φαίνεται και στον Πίνακα Σύγκυσης της ταξινόμησης, η Ακρίβεια του Χρήστη (U.A.) και η Ακρίβεια του Παραγωγού (P.A.) είναι ίσες με μηδέν. Η Ολική Ακρίβεια φτάνει το 92%, αλλά το αποτέλεσμα αυτό είναι πλασματικό καθώς λαμβάνει υπόψη μόνο την κατηγορία Αμπέλι, που είναι πολυπληθέστερη.

	ΑΜΠΕΛΙ	ΕΔΑΦΟΣ	ΑΘΡΟΙΣΜΑ	P.A.
ΑΜΠΕΛΙ	102941.0	8797.0	111738.0	0.92
ΕΔΑΦΟΣ	10.0	0.0	10.0	0.0
ΑΘΡΟΙΣΜΑ	102951.0	8797.0	kappa:	0.0
U.A.	0.99	0.0	O.A.:	0.92

Πίνακας 4.60. Πίνακας Σύγκυσης της ταξινόμησης της περιοχής της Δράμας στο Πείραμα 1.

Μαντινεία

Και στην περιοχή της Μαντινείας η ταξινόμηση δεν ήταν επιτυχής, αν και ο ταξινομητής κατάφερε να εντοπίσει με μεγαλύτερη επιτυχία το φύλλωμα των αμπελιών σε σχέση με τις προηγούμενες δύο περιοχές και να το διαχωρίσει από το έδαφος. Παρ' όλα αυτά, όπως φαίνεται και στον Πίνακα Σύγκυσης παρακάτω, τα εικονοστοιχεία κάθε κατηγορίας ταξινόμησης που ταξινομήθηκαν λανθασμένα ήταν περισσότερα από αυτά που ταξινομήθηκαν σωστά. Για αυτό το λόγο η Ολική Ακρίβεια είναι μειωμένη (O.A. = 26%). Παρακάτω παρατίθενται ένα στιγμιότυπο της ταξινόμησης και ο Πίνακας Σύγκυσης της ταξινόμησης.



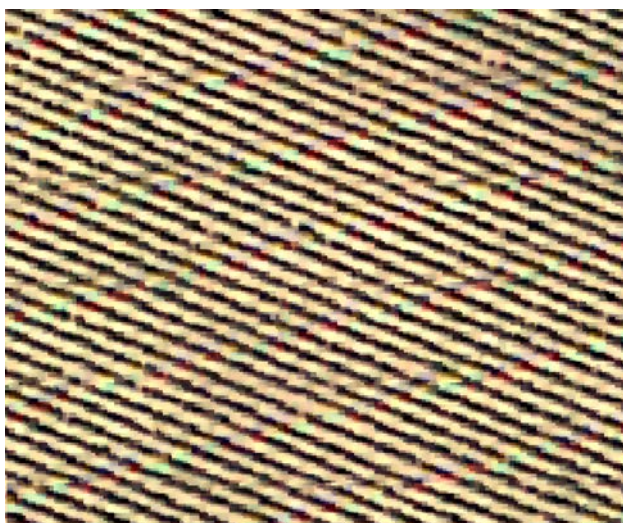
Εικόνα 4.113. Μερικώς εύστοχη ταξινόμηση στην περιοχή της Μαντινείας (πράσινο χρώμα: Αμπέλι, καφέ χρώμα: Έδαφος).

	ΑΜΠΕΛΙ	ΕΔΑΦΟΣ	ΑΘΡΟΙΣΜΑ	P.A.
ΑΜΠΕΛΙ	26891.0	7000.0	33891.0	0.79
ΕΔΑΦΟΣ	94651.0	9551.0	104202.0	0.09
ΑΘΡΟΙΣΜΑ	121542.0	16551.0	κappa:	-0.06
U.A.	0.22	0.58	O.A.:	0.26

Πίνακας 4.61. Πίνακας Σύγχυσης της ταξινόμησης της περιοχής της Μαντινείας στο Πείραμα 1.

Νάουσα 2

Στην περιοχή Νάουσα 2 ο ταξινομητής έκανε την πιο επιτυχημένη ταξινόμηση, από τις τέσσερις που έλαβαν μέρος στο παρόν πείραμα. Κατάφερε να εντοπίσει το φύλλωμα των αμπελιών στο μεγαλύτερο μέρος της εικόνας και να ταξινομήσει ορθά τα περισσότερα εικονοστοιχεία αμπελιού και εδάφους στις αντίστοιχες κατηγορίες. Την επιτυχία της ταξινόμησης καταδεικνύουν και τα ποσοτικά μέτρα αξιολόγησης, καθώς τόσο η Ολική Ακρίβεια όσο και ο δείκτης kappa έχουν υψηλές τιμές, όπως φαίνεται στον Πίνακα Σύγχυσης. Επίσης, η Ακρίβεια του Χρήστη (U.A.) και η Ακρίβεια του Παραγωγού (P.A.) και των δύο κατηγοριών ταξινόμησης έχουν υψηλές τιμές. Παρακάτω παρουσιάζεται ένα παραδείγμα ορθής ταξινόμησης και ο Πίνακας Σύγχυσης.



Εικόνα 4.114. Εύστοχη ταξινόμηση στην περιοχή της Νάουσας 2 (πράσινο χρώμα: Αμπέλι, καφέ χρώμα: Έδαφος).

	ΑΜΠΕΛΙ	ΕΔΑΦΟΣ	ΑΘΡΟΙΣΜΑ	P.A.
ΑΜΠΕΛΙ	31660.0	1316.0	32976.0	0.96
ΕΔΑΦΟΣ	198.0	10937.0	11135.0	0.98
ΑΘΡΟΙΣΜΑ	31858.0	12253.0	κappa:	0.91
U.A.	0.99	0.89	O.A.:	0.97

Πίνακας 4.62. Πίνακας Σύγχυσης της ταξινόμησης της περιοχής της Νάουσας 2 στο Πείραμα 1.

Για τη συγκεντρωτική αξιολόγηση των τεσσάρων περιοχών μελέτης που συμπεριλήφθηκαν στην πρόβλεψη της ταξινόμησης από τον ταξινομητή Random Forest, παρατίθεται ο παρακάτω πίνακας με τα βασικά ποσοτικά μέτρα αξιολόγησης για κάθε εικόνα.

TRAIN	PREDICTION	kappa	O.A.
C / E / K / N1	A	-0,15	71,0%
C / E / K / N1	D	0,0	92,0%
C / E / K / N1	M	-0,06	26,0%
C / E / K / N1	N2	0,91	97,0%

Πίνακας 4.63. Πίνακας συγκεντρωτικών ποσοτικών αποτελεσμάτων για το Πείραμα 1.

Η βελτιωμένη αποτελεσματικότητα του ταξινομητή για την περιοχή της Νάουσας 2 σε σχέση με τις περιοχές του Αμυνταίου, της Δράμας και της Μαντινείας πιθανότατα οφείλεται στη χρήση της περιοχής της Νάουσας 1 για την εκπαίδευση του αλγορίθμου. Πιο συγκεκριμένα, οι περιοχές Νάουσα 1 και 2 είναι τμήματα της ίδιας δορυφορικής εικόνας και επομένως ανήκουν στην ευρύτερη περιοχή της Νάουσας, οπότε είναι αναμενόμενο να ακολουθούνται όμοιες καλλιεργητικές πρακτικές και στις δύο και να μοιάζουν οι φασματικές υπογραφές των αμπελιών και του εδάφους. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα, εκπαιδεύοντας τον αλγόριθμο με τα δεδομένα ελέγχου της Νάουσας 1 να είναι επαρκώς εκπαιδευμένος για την ταξινόμηση της Νάουσας 2.

Πείραμα 2

Στο δεύτερο πείραμα επιλέχθηκε να γίνει μία προσπάθεια ταξινόμησης μόνο στις τρεις μεγαλύτερες περιοχές (Αμύνταιο, Δράμα, Νάουσα 2), καθώς λόγω μεγέθους χαρακτηρίζονται από ποικιλομορφία στις φασματικές υπογραφές των εικονοστοιχείων, με αποτέλεσμα να καθίσταται δυσκολότερη η επιτυχής ταξινόμησή τους. Για την προσέγγιση αυτής της ταξινόμησης θεωρήθηκε απαραίτητο ο ταξινομητής να εκπαιδευτεί με τα δεδομένα ελέγχου αυτών των τριών περιοχών και επιπλέον η εκπαίδευση να ενισχυθεί με τα δεδομένα ελέγχου των δύο περιοχών στις οποίες είχαν συλλεχθεί τα περισσότερα δεδομένα για τις δύο κατηγορίες (Καλή Βρύση, Μαντινεία). Η επιλογή των περιοχών που παίρνουν μέρος στην εκπαίδευση έγινε με κριτήριο την κάλυψη του εύρους των τιμών των φασματικών υπογραφών των εικονοστοιχείων αμπελιού και εδάφους, δηλαδή την κατά το δυνατόν πιο αντιπροσωπευτική εκπαίδευση του ταξινομητή.

TRAIN	PREDICTION
A	A
D	D
N2	N2
K	
M	

Πίνακας 4.64. Περιοχές εκπαίδευσης και πρόβλεψης ταξινόμησης για το Πείραμα 2.

Τα ποσοτικά μέτρα αξιολόγησης της εκπαίδευσης που συμπεριλαμβάνονται στον Πίνακα Σύγκυσης έχουν πολύ υψηλές τιμές, με την Ολική Ακρίβεια να ανέρχεται στο 99% και το δείκτη kappa στο 0,98. Επιπλέον, τα μέτρα U.A. και P.A. έχουν υψηλές τιμές και για τις δύο κατηγορίες ταξινόμησης. Επομένως, η εκπαίδευση του ταξινομητή είναι επιτυχής για τα Αμπέλια και το Έδαφος. Παρακάτω παρατίθεται ο Πίνακας Σύγκυσης της εκπαίδευσης του Πειράματος 2.

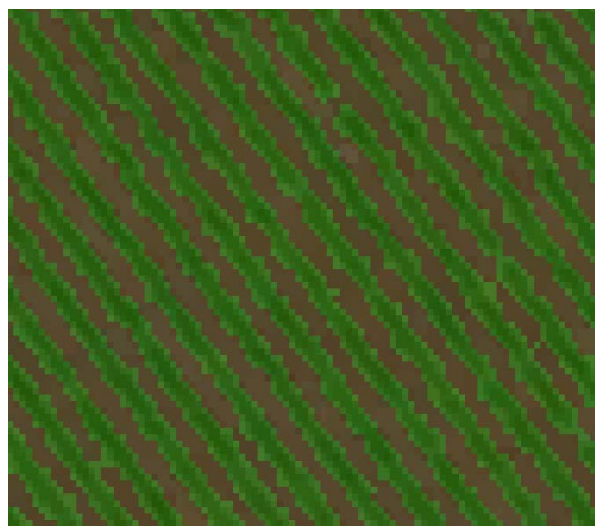
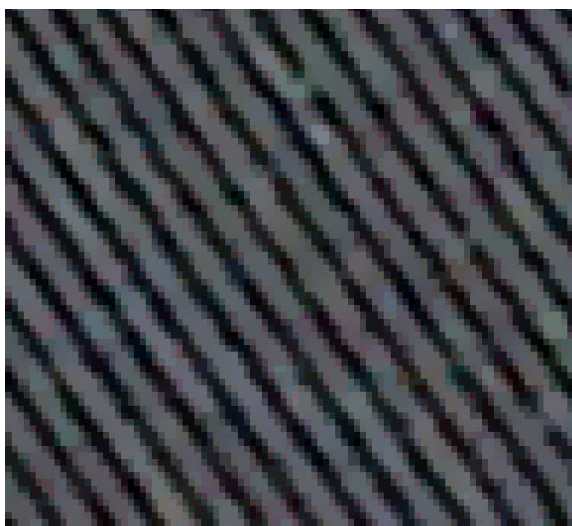
	ΑΜΠΕΛΙ	ΕΔΑΦΟΣ	ΑΘΡΟΙΣΜΑ	P.A.
ΑΜΠΕΛΙ	494968.0	1158.0	496126.0	0.99
ΕΔΑΦΟΣ	906.0	54989.0	55895.0	0.98
ΑΘΡΟΙΣΜΑ	495874.0	56147.0	kappa:	0.98
U.A.	0.99	0.98	O.A.:	0.99

Πίνακας 4.65. Πίνακας Σύγκυσης της εκπαίδευσης του Πειράματος 2.

Ακολούθως, πραγματοποιήθηκε η πρόβλεψη της ταξινόμησης με χρήση του ταξινομητή Random Forest σε κάθε περιοχή μελέτης ξεχωριστά.

Αμύνταιο

Για την περιοχή του Αμυνταίου η ταξινόμηση ήταν επιτυχής και στις δύο κατηγορίες, δηλαδή ο ταξινομητής κατάφερε να εντοπίσει το φύλλωμα των αμπελιών και να το διαχωρίσει από το ενδιάμεσο έδαφος. Η ορθή ταξινόμηση δικαιολογείται από την καλή εκπαίδευση που είχε προηγηθεί στον ταξινομητή, που όπως φαίνεται από το αποτέλεσμα είχε συμπεριλάβει όλο το εύρος των φασματικών υπογραφών των εικονοστοιχείων αμπελιού και εδάφους. Παρακάτω παρουσιάζεται ένα παράδειγμα ορθής ταξινόμησης στην περιοχή του Αμυνταίου.



Εικόνα 4.115. Εύστοχη ταξινόμηση στην περιοχή του Αμυνταίου (πράσινο χρώμα: Αμπέλι, καφέ χρώμα: Έδαφος).

Όπως φαίνεται στον παρακάτω Πίνακα Σύγκυσης, η ποσοτική αξιολόγηση καταδεικνύει επιτυχή ταξινόμηση με την Ολική Ακρίβεια να ισούται με 99% και το

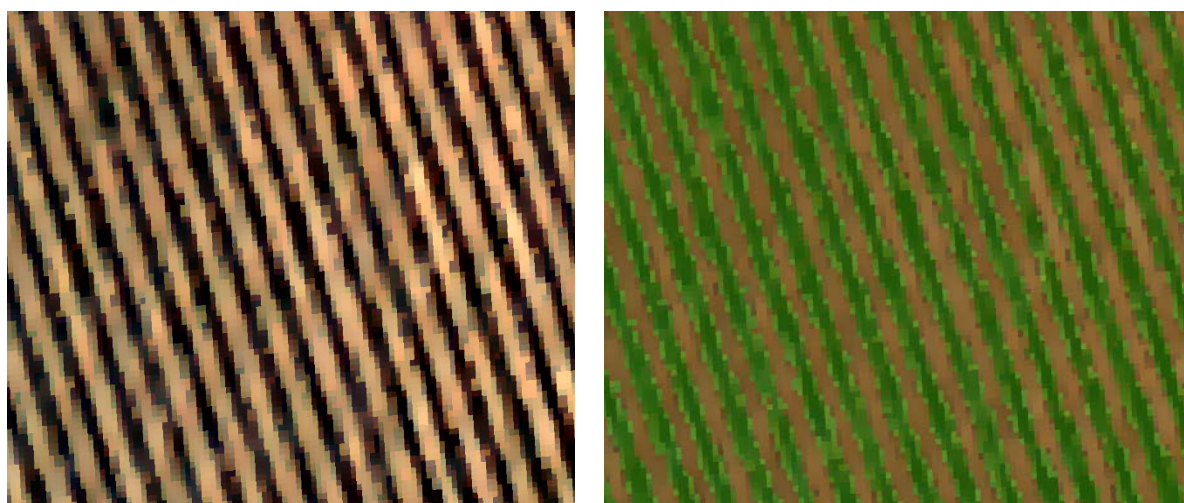
δείκτη κ με 0,98. Επιπρόσθετα, τα εικονοστοιχεία Αμπελιού και Εδάφους ταξινομήθηκαν στην πλειοψηφία τους στη σωστή κατηγορία, όπως αποδεικνύουν τα μέτρα U.A. και P.A., που ισούνται με 0,99. Παρακάτω παρατίθεται ο Πίνακας Σύγχυσης για την πρόβλεψη ταξινόμησης στην περιοχή του Αμυνταίου.

	ΑΜΠΕΛΙ	ΕΔΑΦΟΣ	ΑΘΡΟΙΣΜΑ	P.A.
ΑΜΠΕΛΙ	93135.0	235.0	93370.0	0.99
ΕΔΑΦΟΣ	308.0	20378.0	20686.0	0.99
ΑΘΡΟΙΣΜΑ	93443.0	20613.0	κ :	0.98
U.A.	0.99	0.99	O.A.:	0.99

Πίνακας 4.66. Πίνακας Σύγχυσης της ταξινόμησης της περιοχής του Αμυνταίου στο Πείραμα 2.

Δράμα

Στην περιοχή της Δράμας, η ταξινόμηση ήταν εξίσου επιτυχής με την περιοχή του Αμυνταίου. Ο ταξινομητής κατάφερε να διαχωρίσει το Αμπέλι από το Έδαφος στο μεγαλύτερο μέρος της εικόνας, εντοπίζοντας το φύλλωμα των πρέμνων. Και σε αυτή την περίπτωση η επάρκεια της εκπαίδευσης του ταξινομητή συνεισέφερε στο καλό αποτέλεσμα που προέκυψε. Παρακάτω παρουσιάζεται ένα στιγμιότυπο επιτυχούς ταξινόμησης.



Εικόνα 4.116. Εύστοχη ταξινόμηση στην περιοχή της Δράμας (πράσινο χρώμα: Αμπέλι, καφέ χρώμα: Έδαφος).

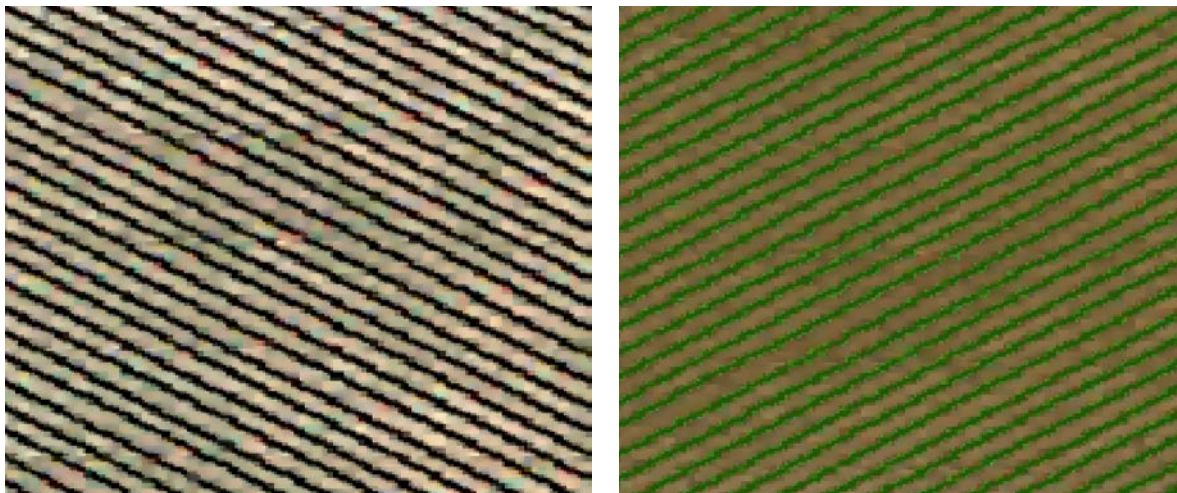
Ο Πίνακας Σύγχυσης για την πρόβλεψη της ταξινόμησης στην περιοχή της Δράμας κατέδειξε επιτυχή ταξινόμηση, με ποσοστό Ολικής Ακρίβειας ίσο με 99% και δείκτη κ ίσο με 0,98. Επιπρόσθετα, η Ακρίβεια του Χρήστη (U.A.) και η Ακρίβεια του Παραγωγού (P.A.) για τις κατηγορίες Αμπέλι και Έδαφος έχουν υψηλές τιμές, δηλαδή τα περισσότερα εικονοστοιχεία που ανήκουν στην πραγματικότητα σε μία κατηγορία ταξινομήθηκαν ορθώς σε αυτή.

	ΑΜΠΕΛΙ	ΕΔΑΦΟΣ	ΑΘΡΟΙΣΜΑ	P.A.
ΑΜΠΕΛΙ	102773.0	82.0	102855.0	0.99
ΕΔΑΦΟΣ	178.0	8715.0	8893.0	0.98
ΑΘΡΟΙΣΜΑ	102951.0	8797.0	kappa:	0.98
U.A.	0.99	0.99	O.A.:	0.99

Πίνακας 4.67. Πίνακας Σύγχυσης της ταξινόμησης της περιοχής της Δράμας στο Πείραμα 2.

Νάουσα 2

Ομοίως, στην περιοχή της Νάουσας 2 η ταξινόμηση επέφερε καλό αποτέλεσμα. Ο ταξινομητής εντόπισε το φύλλωμα των αμπελιών και η πλειοψηφία των εικονοστοιχείων ταξινομήθηκαν σωστά στην κατηγορία όπου ανήκουν στην πραγματικότητα. Παρακάτω παρατίθεται ένα στιγμιότυπο ορθής ταξινόμησης για την περιοχή της Νάουσας 2.



Εικόνα 4.117. Εύστοχη ταξινόμηση στην περιοχή της Νάουσας 2 (πράσινο χρώμα: Αμπέλι, καφέ χρώμα: Έδαφος).

Ο Πίνακας Σύγχυσης για την πρόβλεψη της ταξινόμησης στην περιοχή της Νάουσας 2 καταδεικνύει μία ικανοποιητική ταξινόμηση. Η Ολική Ακρίβεια ισούται με 99% και ο δείκτης kappa με 0,98. Επιπλέον, τα ποσοτικά μέτρα U.A. και P.A. φέρουν υψηλές τιμές και για τις δύο κατηγορίες ταξινόμησης.

	ΑΜΠΕΛΙ	ΕΔΑΦΟΣ	ΑΘΡΟΙΣΜΑ	P.A.
ΑΜΠΕΛΙ	31699.0	160.0	31859.0	0.99
ΕΔΑΦΟΣ	159.0	12093.0	12252.0	0.99
ΑΘΡΟΙΣΜΑ	31858.0	12253.0	kappa:	0.98
U.A.	0.99	0.99	O.A.:	0.99

Πίνακας 4.68. Πίνακας Σύγχυσης της ταξινόμησης της περιοχής της Νάουσας 2 στο Πείραμα 2.

Για τη συγκεντρωτική αξιολόγηση της ταξινόμησης στις τρεις περιοχές μελέτης με τον ταξινομητή Random Forest, παρατίθεται ο παρακάτω πίνακας με τα πιο σημαντικά μέτρα ποσοτικής αξιολόγησης για κάθε εικόνα.

TRAIN	PREDICTION	kappa	O.A.
A / D / N2 / K / M	A	0,98	99,0%
A / D / N2 / K / M	D	0,98	99,0%
A / D / N2 / K / M	N2	0,98	99,0%

Πίνακας 4.69. Πίνακας συγκεντρωτικών ποσοτικών αποτελεσμάτων για το Πείραμα 2.

Όπως φαίνεται στον Πίνακα 4.66, η ταξινόμηση των περιοχών του Αμυνταίου, της Δράμας και της Νάουσας 2 είναι επιτυχής, καθώς η Ολική Ακρίβεια και ο δείκτης kappa έχουν πολύ υψηλές τιμές. Η επιτυχία της ταξινόμησης βασίζεται στα δεδομένα εκπαίδευσης που χρησιμοποιήθηκαν για να εκπαιδεύσουν τον ταξινομητή, στα οποία περιέχονταν τα δεδομένα ελέγχου των υπό ταξινόμηση περιοχών. Επιπλέον, τα δεδομένα εκπαίδευσης των περιοχών της Καλής Βρύσης και της Μαντινείας συνέβαλαν στην κάλυψη μεγαλύτερου εύρους φασματικών τιμών που μπορεί να φέρουν τα εικονοστοιχεία των αμπελιών και του εδάφους.

4.2.2 Πειράματα με χρήση μέρους των δεδομένων ελέγχου (ίσο μέγεθος δειγμάτων)

Στο δεύτερο μέρος των συνδυαστικών πειραμάτων ακολουθήθηκε διαφορετική διαδικασία επιλογής δεδομένων εκπαίδευσης. Παρατηρήθηκε ότι τα δεδομένα ελέγχου που είχαν συλλεχθεί σε όλες τις εικόνες για την κατηγορία Αμπέλι ήταν περισσότερα, τόσο σε αριθμό δειγμάτων όσο και σε πλήθος εικονοστοιχείων, από τα δεδομένα για την κατηγορία Έδαφος. Για να μη μεροληπτεί ο αλγόριθμος υπέρ της κατηγορίας Αμπέλι, κρίθηκε αναγκαίο να χρησιμοποιούνται για την εκπαίδευση όλα τα δεδομένα ελέγχου της κατηγορίας Έδαφος και ένα μέρος των δεδομένων ελέγχου της κατηγορίας Αμπέλι. Σκοπός αυτής της διάκρισης ήταν και οι δύο κατηγορίες να εκπροσωπούνται ισοβαρώς στην εκπαίδευση του ταξινομητή. Ο τρόπος επιλογής ενός μέρους των δεδομένων ελέγχου της κατηγορίας Αμπέλι ήταν όμοιος για όλες τις εικόνες και αφορούσε σε ένα κλάσμα, που προέκυπτε από το λόγο του αριθμού των δεδομένων ελέγχου για το Έδαφος προς τον αριθμό δεδομένων ελέγχου για το Αμπέλι. Παρακάτω παρατίθεται ένας Πίνακας που περιλαμβάνει το σύνολο των δειγμάτων που συλλέχθηκαν για κάθε κατηγορία ταξινόμησης, το άθροισμά τους και το ποσοστό δεδομένων κάθε εικόνας που χρησιμοποιήθηκε για την εκπαίδευση του ταξινομητή (αναλογία).

ΠΕΡΙΟΧΗ ΜΕΛΕΤΗΣ	ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΕΛΕΓΧΟΥ			ΑΝΑΛΟΓΙΑ
	ΑΜΠΕΛΙ	ΕΔΑΦΟΣ	ΑΘΡΟΙΣΜΑ	
ΑΜΥΝΤΑΙΟ	154	46	200	0,30
ΚΡΗΤΗ	170	40	210	0,24
ΔΡΑΜΑ	117	40	157	0,34
ΕΠΑΝΟΜΗ	190	40	230	0,21
ΚΑΛΗ ΒΡΥΣΗ	240	50	290	0,21
ΜΑΝΤΙΝΕΙΑ	275	55	330	0,20
ΝΑΟΥΣΑ 1	200	30	230	0,15
ΝΑΟΥΣΑ 2	56	30	86	0,54

Πίνακας 4.70. Πίνακας Δεδομένων Ελέγχου για τις κατηγορίες ταξινόμησης (Έδαφος, Αμπέλι).

Για κάθε περιοχή μελέτης που συμμετείχε στην εκπαίδευση του αλγορίθμου γινόταν λήψη του αντίστοιχου ποσοστού δεδομένων ελέγχου και στη συνέχεια το σύνολο των δεδομένων που είχαν ληφθεί για όλες τις περιοχές χρησιμοποιούνταν στην εκπαίδευση του ταξινομητή.

Και με αυτή τη μεθοδολογία εκπαίδευσης υλοποιήθηκε μία σειρά πειραμάτων, από τα οποία παρουσιάζονται αυτά με τα πιο ικανοποιητικά αποτελέσματα.

Πείραμα 3

Σε αυτό το πείραμα επιλέχθηκε να γίνει πρόβλεψη της ταξινόμησης σε μία περιοχή και να χρησιμοποιηθούν όλες οι υπόλοιπες περιοχές για την εκπαίδευση του ταξινομητή. Η υπό ταξινόμηση περιοχή ήταν η Νάουσα 2, καθώς όπως φαίνεται στο Διάγραμμα διαφορών των φασματικών υπογραφών (Εικόνα 4.95) ήταν η περιοχή με τη μεγαλύτερη φασματική διαφοροποίηση μεταξύ των δύο κατηγοριών. Επομένως, εκπαιδεύοντας τον αλγόριθμο με δεδομένα ελέγχου από επτά περιοχές μελέτης ήταν πιο πιθανό να προκύψει ακριβέστερη ταξινόμηση, καθώς ο ταξινομητής θα μπορούσε να προβλέψει τη φασματική ανομοιογένεια που υπήρχε στην εικόνα.

TRAIN	PREDICTION
A	N2
C	
D	
E	
K	
M	
N1	

Πίνακας 4.71. Περιοχές εκπαίδευσης και πρόβλεψης ταξινόμησης για το Πείραμα 3.

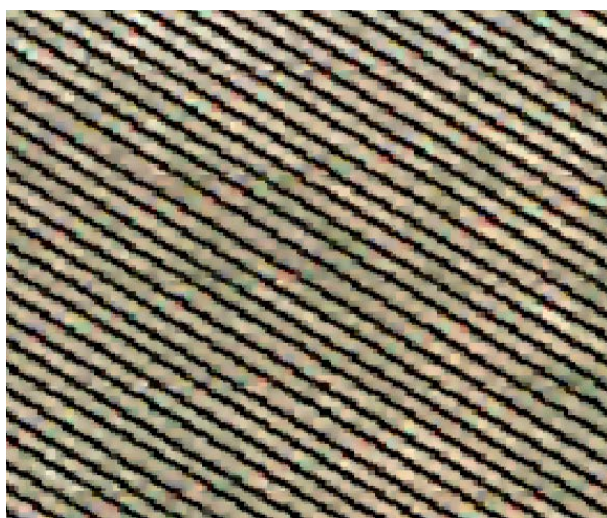
Λόγω της παραπάνω μεθοδολογίας που υλοποιήθηκε για τα δεδομένα εκπαίδευσης, ο Πίνακας Σύγχυσης που προέκυψε για την εκπαίδευση του ταξινομητή δεν περιλαμβάνει στοιχεία για την κατηγορία Έδαφος. Αυτό οφείλεται στη χρήση όλων των δεδομένων ελέγχου αυτής της κατηγορίας για την εκπαίδευση

του ταξινομητή. Δηλαδή για την αξιολόγηση της εκπαίδευσης χρησιμοποιήθηκαν δεδομένα μόνο για την κατηγορία Αμπέλι. Επομένως, η υψηλή τιμή της Ολικής Ακρίβειας είναι πλασματική αλλά είναι μία ένδειξη της ορθής υλοποίησης της διαδικασίας εκπαίδευσης. Παρακάτω παρατίθεται ο Πίνακας Σύγχυσης για το Πείραμα 3.

	ΑΜΠΕΛΙ	ΕΔΑΦΟΣ	ΑΘΡΟΙΣΜΑ	P.A.
ΑΜΠΕΛΙ	610926.0	0.0	610926.0	0.99
ΕΔΑΦΟΣ	4420.0	0.0	4420.0	0.0
ΑΘΡΟΙΣΜΑ	615346.0	0.0	kappa:	0.0
U.A.	0.99	0.0	O.A.:	0.99

Πίνακας 4.72. Πίνακας Σύγχυσης της εκπαίδευσης του Πειράματος 3.

Στη συνέχεια, υλοποιήθηκε η πρόβλεψη της ταξινόμησης με τον ταξινομητή Random Forest για την περιοχή της Νάουσας 2. Ο ταξινομητής κατάφερε να εντοπίσει το φύλλωμα των αμπελιών και να τα διαχωρίσει από το ενδιάμεσο έδαφος στο μεγαλύτερο μέρος της εικόνας. Κάποιες αστοχίες υπήρξαν σε σημεία όπου ενδιάμεσα των αμπελιών υπήρχε έντονη βλάστηση ή τα αμπέλια δεν ήταν αρκετά ανεπτυγμένα. Όπως αποδείχθηκε από το αποτέλεσμα της ταξινόμησης, ο αλγόριθμος ήταν ικανοποιητικά εκπαιδευμένος για να ταξινομήσει μία περιοχή με μεγάλη φασματική ετερογένεια. Παρακάτω παρουσιάζονται δύο παραδείγματα ταξινόμησης της εικόνας της Νάουσας 2, ένα επιτυχούς και ένα άστοχης ταξινόμησης.



Εικόνα 4.118. Εύστοχη ταξινόμηση στην περιοχή της Νάουσας 2 (πράσινο χρώμα: Αμπέλι, καφέ χρώμα: Έδαφος).



Εικόνα 4.119. Άστοχη ταξινόμηση στην περιοχή της Νάουσας 2
(πράσινο χρώμα: Αμπέλι, καφέ χρώμα: Έδαφος).

Ο Πίνακας Σύγχυσης που προέκυψε για την ταξινόμηση της εικόνας της Νάουσας 2 καταδεικνύει μία επιτυχή ταξινόμηση, καθώς η Ολική Ακρίβεια ανέρχεται σε ποσοστό 82%. Ένα ακόμα συμπέρασμα που προκύπτει από τον Πίνακα είναι ότι ο αλγόριθμος αστόχησε εν μέρει να ταξινομήσει σωστά τα εικονοστοιχεία εδάφους στην κατηγορία Έδαφος, καθώς ο αριθμός των εικονοστοιχείων που ταξινομήθηκαν σωστά σε αυτή την κλάση είναι μικρότερος από τον αριθμό αυτών που ταξινομήθηκαν λανθασμένα σε αυτή. Για το λόγο αυτό, η Ακρίβεια του Χρήστη (U.A.) είναι πολύ μικρότερη για την κατηγορία Έδαφος συγκριτικά με την κατηγορία Αμπέλι. Επίσης, στην ίδια αιτία οφείλεται και η μειωμένη τιμή του δείκτη kappa του πειράματος.

	ΑΜΠΕΛΙ	ΕΔΑΦΟΣ	ΑΘΡΟΙΣΜΑ	P.A.
ΑΜΠΕΛΙ	31742.0	7636.0	39378.0	0.81
ΕΔΑΦΟΣ	116.0	4617.0	4733.0	0.98
ΑΘΡΟΙΣΜΑ	31858.0	12253.0	kappa:	0.46
U.A.	0.99	0.38	O.A.:	0.82

Πίνακας 4.73. Πίνακας Σύγχυσης της ταξινόμησης της Νάουσας 2 στο Πείραμα 3.

Πείραμα 4

Στο τέταρτο πείραμα χρησιμοποιήθηκαν τέσσερις περιοχές μελέτης για την εκπαίδευση του ταξινομητή (Αμύνταιο, Δράμα, Επανομή, Μαντινεία) και η ταξινόμηση υλοποιήθηκε σε όλες τις περιοχές μελέτης. Η επιλογή των περιοχών εκπαίδευσης βασίστηκε στο Διάγραμμα φασματικής συμπεριφοράς Αμπελιών (Εικόνα 4.93) και στο Διάγραμμα φασματικής συμπεριφοράς Εδάφους (Εικόνα 4.94). Από τα διαγράμματα προέκυψε το συμπέρασμα ότι αυτές οι τέσσερις περιοχές παρουσιάζουν παρόμοια φασματική συμπεριφορά στις δύο κατηγορίες ταξινόμησης και επιπλέον οι καμπύλες τους σε κάθε διάγραμμα είναι σχεδόν παράλληλες και συγκλίνουν εντός του ίδιου εύρους τιμών. Επομένως, φάνηκε να δημιουργούν ένα σύστημα μοντελοποίησης της φασματικής απόκρισης αμπελιών και εδάφους στις προκείμενες περιοχές μελέτης και μελετήθηκε αν μπορούν να εκπαιδεύσουν

επαρκώς τον ταξινομητή για να προβλέψει την ταξινόμηση και των περιοχών που παρουσιάζουν απόκλιση στη φασματική τους συμπεριφορά.

TRAIN	PREDICTION
A / D / E / M	A / C / D / E / K / M / N1 / N2

Πίνακας 4.74. Περιοχές εκπαίδευσης και πρόβλεψης ταξινόμησης για το Πείραμα 4.

Στον Πίνακα Σύγκρισης που προέκυψε για την εκπαίδευση του ταξινομητή δεν περιλαμβάνονται δεδομένα για την κατηγορία Έδαφος, γιατί όλα τα δεδομένα ελέγχου αυτής της κατηγορίας χρησιμοποιήθηκαν για την εκπαίδευση του αλγορίθμου. Επομένως, στην αξιολόγηση της εκπαίδευσης συμμετέχουν μόνο τα δεδομένα ελέγχου της κατηγορίας Αμπέλι και η ολική Ακρίβεια είναι πλασματική, αλλά αποδεικνύει την ορθή υλοποίηση της μεθοδολογίας εκπαίδευσης.

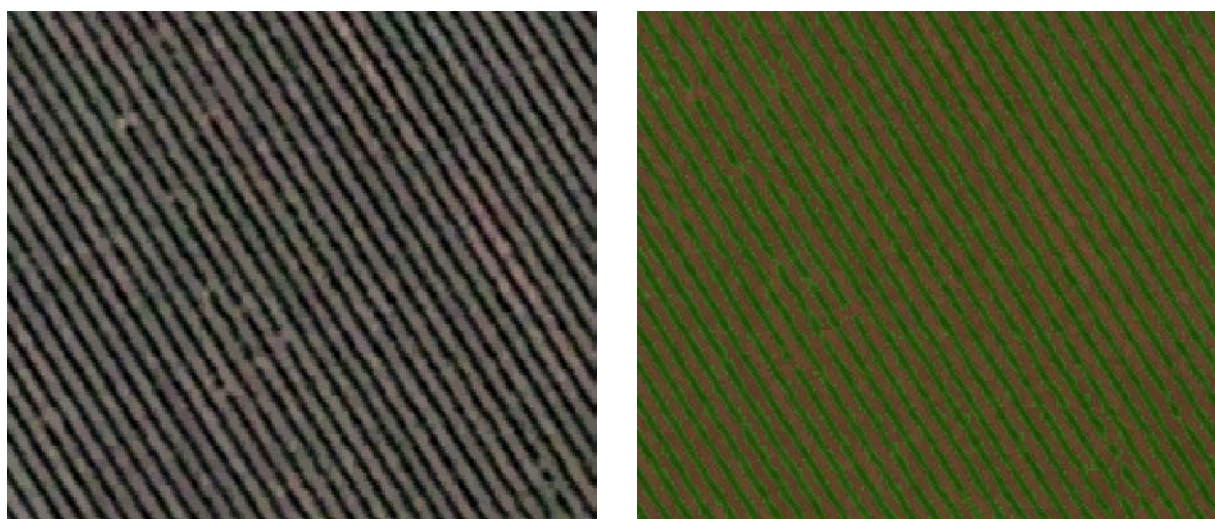
	ΑΜΠΕΛΙ	ΕΔΑΦΟΣ	ΑΘΡΟΙΣΜΑ	P.A.
ΑΜΠΕΛΙ	353783.0	0.0	353783.0	0.99
ΕΔΑΦΟΣ	3023.0	0.0	3023.0	0.0
ΑΘΡΟΙΣΜΑ	356806.0	0.0	kappa:	0.0
U.A.	0.99	0.0	O.A.:	0.99

Πίνακας 4.75. Πίνακας Σύγκρισης της εκπαίδευσης του Πειράματος 4.

Ακολουθώντας, εφαρμόστηκε η ταξινόμηση με τον ταξινομητή Random Forest για κάθε περιοχή μελέτης ξεχωριστά.

Αμύνταιο

Το αποτέλεσμα της ταξινόμησης για την περιοχή του Αμυνταίου ήταν επιτυχές, καθώς εντοπίστηκε το φύλλωμα των αμπελιών και η πλειοψηφία των εικονοστοιχείων αμπελιού και εδάφους ταξινομήθηκαν ορθά στην αντίστοιχη κατηγορία. Παρακάτω παρατίθεται ένα στιγμιότυπο από την ταξινόμηση στην εικόνα του Αμυνταίου.



Εικόνα 4.120. Εύστοχη ταξινόμηση στην περιοχή του Αμυνταίου (πράσινο χρώμα: Αμπέλι, καφέ χρώμα: Έδαφος).

Από τον Πίνακα Σύγκυσης προκύπτει ότι η ταξινόμηση ήταν επιτυχής, καθώς η Ολική Ακρίβεια ανέρχεται στο 99% και ο δείκτης kappa στο 0,99. Επιπλέον, τα εικονοστοιχεία που ταξινομήθηκαν εσφαλμένα στην αντίθετη κατηγορία από αυτή που ανήκουν στην πραγματικότητα είναι πολύ λιγότερα από αυτά που ταξινομήθηκαν σωστά. Παρακάτω παρατίθεται ο Πίνακας Σύγκυσης για την πρόβλεψη της ταξινόμησης στην περιοχή μελέτης του Αμυνταίου.

	ΑΜΠΕΛΙ	ΕΔΑΦΟΣ	ΑΘΡΟΙΣΜΑ	P.A.
ΑΜΠΕΛΙ	93190.0	30.0	93220.0	0.99
ΕΔΑΦΟΣ	253.0	20583.0	20836.0	0.99
ΑΘΡΟΙΣΜΑ	93443.0	20613.0	kappa:	0.99
U.A.	0.99	0.99	O.A.:	0.99

Πίνακας 4.76. Πίνακας Σύγκυσης της ταξινόμησης του Αμυνταίου στο Πείραμα 4.

Κρήτη

Στην περιοχή μελέτης της Κρήτης η ταξινόμηση δεν ήταν επιτυχής. Ο αλγόριθμος απέτυχε να εντοπίσει σωστά το φύλλωμα, καθώς ταξινόμησε σχεδόν το σύνολο των εικονοστοιχείων του εδάφους στην κατηγορία Αμπέλι. Αυτή η αστοχία οφείλεται στην έντονη αυτοφυή βλάστηση που υπάρχει στο έδαφος, ενδιάμεσα από τις γραμμές των αμπελιών, καθώς και στην ασυνέχεια του γραμμικού προτύπου των αμπελιών σε πολλά αμπελοτεμάχια, που επιφέρει σύγκυση στη φασματική συμπεριφορά αμπελιών και εδάφους.

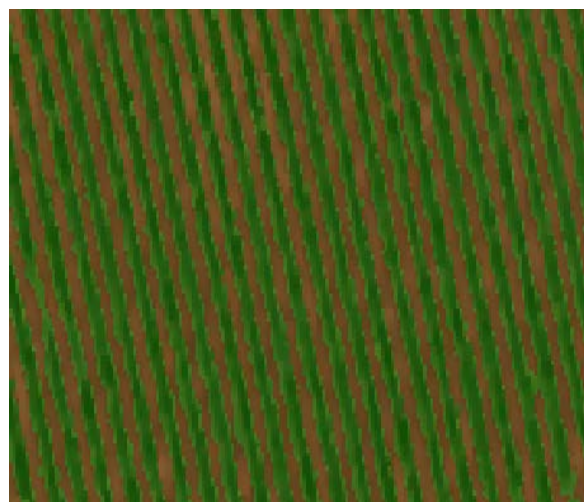
Παρακάτω παρατίθεται ο Πίνακας Σύγκυσης της ταξινόμησης για την περιοχή της Κρήτης. Η Ολική Ακρίβεια ανέρχεται στο 91%, αλλά η τιμή αυτή είναι πλασματική καθώς τα εικονοστοιχεία εδάφους που ταξινομήθηκαν σωστά είναι μόνο τρία και το αποτέλεσμα της ακρίβειας προέρχεται μόνο από την επιτυχή ταξινόμηση των εικονοστοιχείων των αμπελιών. Για τον ίδιο λόγο ο δείκτης kappa έχει τιμή ίση με μηδέν.

	ΑΜΠΕΛΙ	ΕΔΑΦΟΣ	ΑΘΡΟΙΣΜΑ	P.A.
ΑΜΠΕΛΙ	32175.0	3021.0	35196.0	0.91
ΕΔΑΦΟΣ	0.0	3.0	3.0	0.99
ΑΘΡΟΙΣΜΑ	32175.0	3024.0	kappa:	0.0
U.A.	0.99	0.0	O.A.:	0.91

Πίνακας 4.77. Πίνακας Σύγκυσης της ταξινόμησης της Κρήτης στο Πείραμα 4.

Δράμα

Για την περιοχή της Δράμας, το αποτέλεσμα της ταξινόμησης ήταν πολύ ικανοποιητικό. Ο ταξινομητής κατάφερε να εντοπίσει με επιτυχία το φύλλωμα των αμπελιών σχεδόν σε όλα τα αμπελοτεμάχια και να διαχωρίσει τα αμπέλια από το ενδιάμεσο έδαφος. Παρακάτω παρουσιάζεται ένα παράδειγμα επιτυχούς ταξινόμησης.



Εικόνα 4.121. Εύστοχη ταξινόμηση στην περιοχή της Δράμας
(πράσινο χρώμα: Αμπέλι, καφέ χρώμα: Έδαφος).

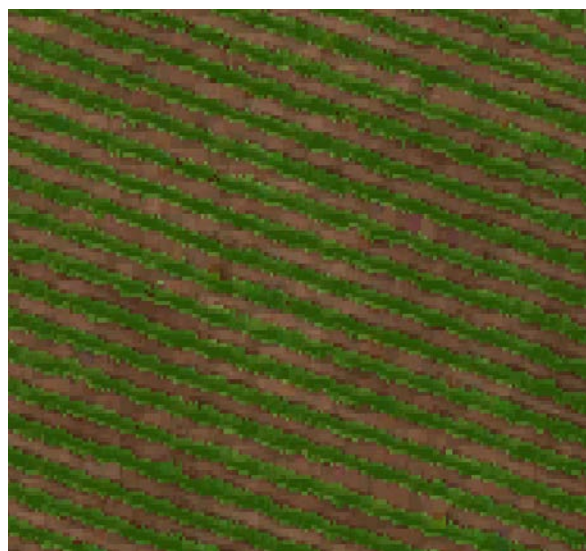
Η ποσοτική αξιολόγηση επίσης κατέδειξε την επιτυχία της ταξινόμησης, με την Ολική Ακρίβεια να φτάνει το 99% και το δείκτη kappa να ισούται με 0,99. Επιπλέον, τα εικονοστοιχεία που ταξινομήθηκαν σε λάθος κατηγορία είναι ελάχιστα συγκριτικά με το σύνολο των εικονοστοιχείων που έλαβαν μέρος στην ταξινόμηση.

	ΑΜΠΕΛΙ	ΕΔΑΦΟΣ	ΑΘΡΟΙΣΜΑ	P.A.
ΑΜΠΕΛΙ	102835.0	5.0	102840.0	0.99
ΕΔΑΦΟΣ	116.0	8792.0	8908.0	0.99
ΑΘΡΟΙΣΜΑ	102951.0	8797.0	kappa:	0.99
U.A.	0.99	0.99	O.A.:	0.99

Πίνακας 4.78. Πίνακας Σύγχυσης της ταξινόμησης της Δράμας στο Πείραμα 4.

Επανομή

Στην περιοχή της Επανομής ο ταξινομητής πέτυχε το διαχωρισμό των αμπελιών από το έδαφος και τον ορθό εντοπισμό του φυλλώματος των πρέμνων. Η συμμετοχή της περιοχής στην εκπαίδευση του αλγορίθμου συνέβαλε στην αποτελεσματικότητα της ταξινόμησης. Σύμφωνα με τον Πίνακα Σύγχυσης της ταξινόμησης, η Ολική Ακρίβεια ανέρχεται στο 99% και ο δείκτης kappa στο 0,88. Επιπλέον, υπήρξε μεγαλύτερη αστοχία στην ταξινόμηση εικονοστοιχείων αμπελιών σε σχέση με τα εικονοστοιχεία εδάφους. Παρακάτω παρουσιάζονται ένα στιγμιότυπο επιτυχούς ταξινόμησης και ο Πίνακας Σύγχυσης της ταξινόμησης.



Εικόνα 4.122. Εύστοχη ταξινόμηση στην περιοχή της Επανομής (πράσινο χρώμα: Αμπέλι, καφέ χρώμα: Έδαφος).

	ΑΜΠΕΛΙ	ΕΔΑΦΟΣ	ΑΘΡΟΙΣΜΑ	P.A.
ΑΜΠΕΛΙ	161107.0	39.0	161146.0	0.99
ΕΔΑΦΟΣ	2504.0	10154.0	12658.0	0.8
ΑΘΡΟΙΣΜΑ	163611.0	10193.0	kappa:	0.88
U.A.	0.98	0.99	O.A.:	0.99

Πίνακας 4.79. Πίνακας Σύγχυσης της ταξινόμησης της Επανομής στο Πείραμα 4.

Καλή Βρύση

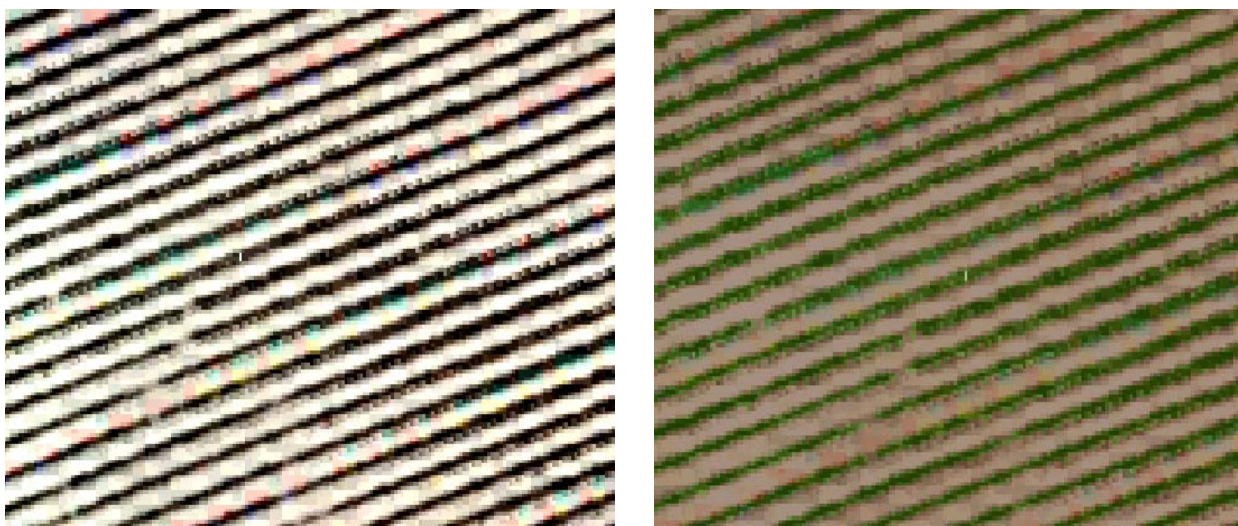
Για την περιοχή μελέτης της Καλής Βρύσης η ταξινόμηση ήταν πλήρως αναποτελεσματική, καθώς όλα τα εικονοστοιχεία του εδάφους ταξινομήθηκαν λανθασμένα στην κατηγορία Αμπέλι. Από αυτό το αποτέλεσμα προκύπτει το συμπέρασμα ότι τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν για την εκπαίδευση του αλγορίθμου δεν ήταν αντιπροσωπευτικά για τη φασματική συμπεριφορά που παρουσιάζει η κατηγορία Έδαφος στην εικόνα της Καλής Βρύσης. Η Ολική Ακρίβεια που παρουσιάζεται στον Πίνακα Σύγχυσης της ταξινόμησης είναι πλασματική, διότι στον υπολογισμό της συμβάλλουν μόνο τα εικονοστοιχεία της κατηγορίας Αμπέλι. Παρακάτω παρατίθεται ο Πίνακας Σύγχυσης για την πρόβλεψη της ταξινόμησης στην περιοχή της Καλής Βρύσης.

	ΑΜΠΕΛΙ	ΕΔΑΦΟΣ	ΑΘΡΟΙΣΜΑ	P.A.
ΑΜΠΕΛΙ	206131.0	4170.0	210301.0	0.98
ΕΔΑΦΟΣ	0.0	0.0	0.0	0.0
ΑΘΡΟΙΣΜΑ	206131.0	4170.0	kappa:	0.0
U.A.	0.99	0.0	O.A.:	0.98

Πίνακας 4.80. Πίνακας Σύγχυσης της ταξινόμησης της Καλής Βρύσης στο Πείραμα 4.

Μαντινεία

Η ταξινόμηση που προέκυψε για την περιοχή μελέτης της Μαντινείας ήταν επιτυχής, με τον ταξινομητή να εντοπίζει το φύλλωμα των πρέμνων και να διαχωρίζει τα εικονοστοιχεία των αμπελιών από αυτά του εδάφους στο μεγαλύτερο μέρος της εικόνας. Η Ολική Ακρίβεια της ταξινόμησης και ο δείκτης kappa έχουν πολύ υψηλές τιμές και τα εικονοστοιχεία που ταξινομήθηκαν λανθασμένα είναι περιορισμένα και στις δύο κατηγορίες ταξινόμησης.



Εικόνα 4.123. Εύστοχη ταξινόμηση στην περιοχή της Μαντινείας (πράσινο χρώμα: Αμπέλι, καφέ χρώμα: Έδαφος).

	ΑΜΠΕΛΙ	ΕΔΑΦΟΣ	ΑΘΡΟΙΣΜΑ	P.A.
ΑΜΠΕΛΙ	121313.0	7.0	121320.0	0.99
ΕΔΑΦΟΣ	229.0	16544.0	16773.0	0.99
ΑΘΡΟΙΣΜΑ	121542.0	16551.0	kappa:	0.99
U.A.	0.99	0.99	O.A.:	0.99

Πίνακας 4.81. Πίνακας Σύγχυσης της ταξινόμησης της Μαντινείας στο Πείραμα 4.

Νάουσα 1

Στην περιοχή μελέτης της Νάουσας 1, το αποτέλεσμα της ταξινόμησης δεν ήταν ικανοποιητικό καθώς ο ταξινομητής αστόχησε να εντοπίσει το φύλλωμα των αμπελιών. Η αστοχία αυτή οφείλεται στην απουσία των δεδομένων αναφοράς της εικόνας από την εκπαίδευση του αλγορίθμου. Επομένως, είναι σαφές ότι τα δεδομένα εκπαίδευσης που χρησιμοποιήθηκαν δεν κάλυπταν τη φασματική απόκριση των εικονοστοιχείων των αμπελιών και του εδάφους της περιοχής της Νάουσας 1. Αυτό το συμπέρασμα στοιχειοθετείται και από τα Διαγράμματα φασματικής συμπεριφοράς Αμπελιών και Εδάφους (Εικόνες 4.93, 4.94), όπου η καμπύλη που αντιστοιχεί στη συγκεκριμένη περιοχή δε συγκλίνει με καμία άλλη καμπύλη και στις δύο κατηγορίες ταξινόμησης.

Στον Πίνακα Σύγκυσης της ταξινόμησης, η τιμή της Ολικής Ακρίβειας είναι πλασματική, καθώς μόνο ένα εικονοστοιχείο εδάφους ταξινομήθηκε σωστά στην αντίστοιχη κατηγορία. Επομένως, η ταξινόμηση απέτυχε πλήρως στην κατηγορία Έδαφος και για αυτό το λόγο ο δείκτης kappa έχει τιμή μηδέν.

	ΑΜΠΕΛΙ	ΕΔΑΦΟΣ	ΑΘΡΟΙΣΜΑ	P.A.
ΑΜΠΕΛΙ	87034.0	9495.0	96529.0	0.9
ΕΔΑΦΟΣ	0.0	1.0	1.0	0.99
ΑΘΡΟΙΣΜΑ	87034.0	9496.0	kappa:	0.0
U.A.	0.99	0.0	O.A.:	0.9

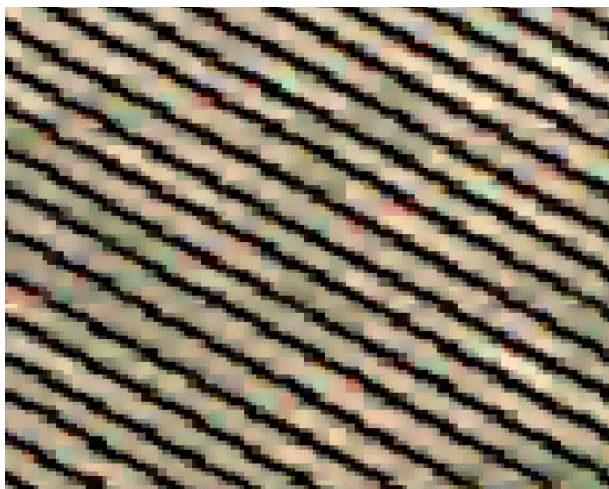
Πίνακας 4.82. Πίνακας Σύγκυσης της ταξινόμησης της Νάουσας 1 στο Πείραμα 4.

Νάουσα 2

Στην περιοχή της Νάουσας 2, η ταξινόμηση που προέκυψε ήταν εν μέρει επιτυχής. Πιο συγκεκριμένα, ο ταξινομητής κατάφερε να εντοπίσει το φύλλωμα των αμπελιών αλλά αστόχησε σε μεγάλο βαθμό στη σωστή ταξινόμηση των εικονοστοιχείων του εδάφους. Η έντονη ενδιάμεση βλάστηση στο έδαφος και οι σκούροι τόνοι του χρώματος του εδάφους σε κάποια σημεία οδήγησαν στη σύγκυση των δύο κατηγοριών. Παρακάτω παρουσιάζονται δύο στιγμιότυπα, ένα επιτυχούς και ένα άστοχης ταξινόμησης.



Εικόνα 4.124. Εύστοχη ταξινόμηση στην περιοχή της Νάουσας 2 (πράσινο χρώμα: Αμπέλι, καφέ χρώμα: Έδαφος).



Εικόνα 4.125. Άστοχη ταξινόμηση στην περιοχή της Νάουσας 2
(πράσινο χρώμα: Αμπέλι, καφέ χρώμα: Έδαφος).

Όπως προκύπτει από τον παρακάτω Πίνακα Σύγχυσης, η ταξινόμηση είναι αποτελεσματική καθώς η Ολική Ακρίβεια ανέρχεται στο 76%. Ο δείκτης kappa έχει χαμηλή τιμή, λόγω της άστοχης ταξινόμησης των εικονοστοιχείων του εδάφους, καθώς από το σύνολο των 12253 εικονοστοιχείων μόνο τα 1663 ταξινομήθηκαν σωστά στην κλάση Έδαφος. Παρακάτω παρατίθεται ο Πίνακας Σύγχυσης της πρόβλεψης της ταξινόμησης στην περιοχή μελέτης της Νάουσας 2.

	ΑΜΠΕΛΙ	ΕΔΑΦΟΣ	ΑΘΡΟΙΣΜΑ	P.A.
ΑΜΠΕΛΙ	31810.0	10590.0	42400.0	0.75
ΕΔΑΦΟΣ	48.0	1663.0	1711.0	0.97
ΑΘΡΟΙΣΜΑ	31858.0	12253.0	kappa:	0.18
U.A.	0.99	0.14	O.A.:	0.76

Πίνακας 4.83. Πίνακας Σύγχυσης της ταξινόμησης της Νάουσας 2 στο Πείραμα 4.

Για τη συγκεντρωτική αξιολόγηση της ταξινόμησης του Random Forest σε όλες τις περιοχές μελέτης παρατίθεται ο παρακάτω πίνακας με τα πιο σημαντικά ποσοτικά μέτρα αξιολόγησης κάθε εικόνας.

TRAIN	PREDICTION	kappa	O.A.
A / D / E / M	A	0,99	99,0%
A / D / E / M	C	0,0	91,0%
A / D / E / M	D	0,99	99,0%
A / D / E / M	E	0,88	99,0%
A / D / E / M	K	0,0	98,0%
A / D / E / M	M	0,99	99,0%
A / D / E / M	N1	0,0	90,0%
A / D / E / M	N2	0,18	76,0%

Πίνακας 4.84. Πίνακας συγκεντρωτικών ποσοτικών αποτελεσμάτων για το Πείραμα 4.

Από τον Πίνακα 4.81, συνδυάζοντας τις τιμές της Ολικής Ακρίβειας και του δείκτη kappa, είναι προφανές ότι ο ταξινομητής κατάφερε να εντοπίσει το φύλλωμα των πρέμνων και να διαχωρίσει τα αμπέλια από το έδαφος στις τέσσερις περιοχές που

συμμετείχαν και στην εκπαίδευση (Αμύνταιο, Δράμα, Επανομή, Μαντινεία). Στις περιοχές της Κρήτης, της Καλής Βρύσης και της Νάουσας 1 ο δείκτης kappa είναι μηδέν και η Ολική Ακρίβεια που παρουσιάζεται με υψηλές τιμές είναι πλασματική, καθώς ο ταξινομητής απέτυχε να ταξινομήσει σωστά τα εικονοστοιχεία εδάφους. Όπως προαναφέρθηκε, αυτή η αστοχία οφείλεται στην αυτοφυή βλάστηση στο έδαφος και στις διαφορετικές καλλιεργητικές πρακτικές που χρησιμοποιούνται σε κάθε περιοχή, που προκαλεί ποικιλομορφία στη φασματική απόκριση των εικονοστοιχείων κάθε περιοχής. Επιπλέον, στην ποικιλομορφία αυτή συμβάλλει και ο τύπος και η υγρασία των εδαφών, καθώς σε άλλα σημεία είναι πιο φωτεινά και σε άλλα έχουν πιο σκούρους τόνους χρώματος και μοιάζουν με τα αμπέλια. Τέλος, αξιοσημείωτη είναι η ταξινόμηση του Random Forest στην περιοχή της Νάουσας 2, όπου επιτεύχθηκε ορθή ταξινόμηση μόνο για την κατηγορία Αμπέλι. Και σε αυτή την περίπτωση, σημαντικό ρόλο διαδραμάτισε η φασματική ομοιότητα των εικονοστοιχείων του εδάφους με αυτά των αμπελιών.

Πείραμα 5

Σύμφωνα με τα συμπεράσματα του προηγούμενου πειράματος, στο πέμπτο πείραμα επιλέχθηκε να χρησιμοποιηθούν για την εκπαίδευση και την ταξινόμηση μόνο οι τέσσερις περιοχές των οποίων οι φασματικές συμπεριφορές συγκλίνουν μεταξύ τους. Πιο συγκεκριμένα, για την εκπαίδευση του αλγορίθμου χρησιμοποιήθηκαν οι περιοχές της Δράμας και της Μαντινείας και για την ταξινόμηση οι περιοχές του Αμυνταίου και της Επανομής. Στόχος ήταν ο ταξινομητής να εκπαιδευτεί με δύο περιοχές και να προβλέψει την ταξινόμηση για δύο άλλες περιοχές, παρόμοιες φασματικά με τις πρώτες.

TRAIN	PREDICTION
D / M	A
D / M	E

Πίνακας 4.85. Περιοχές εκπαίδευσης και πρόβλεψης ταξινόμησης στο Πείραμα 5.

Από τον Πίνακα Σύγχυσης που προέκυψε για την εκπαίδευση του ταξινομητή λείπουν δεδομένα για την κατηγορία Έδαφος, γιατί χρησιμοποιήθηκαν όλα τα δεδομένα ελέγχου αυτής της κατηγορίας στην εκπαίδευση. Επιπλέον, η τιμή της Ολικής Ακρίβειας είναι πλασματική αλλά παρατηρείται ότι τα περισσότερα εικονοστοιχεία της κατηγορίας Αμπέλι ταξινομούνται σωστά.

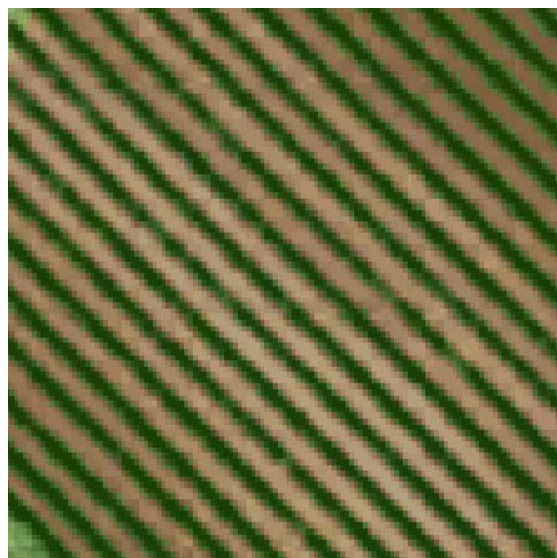
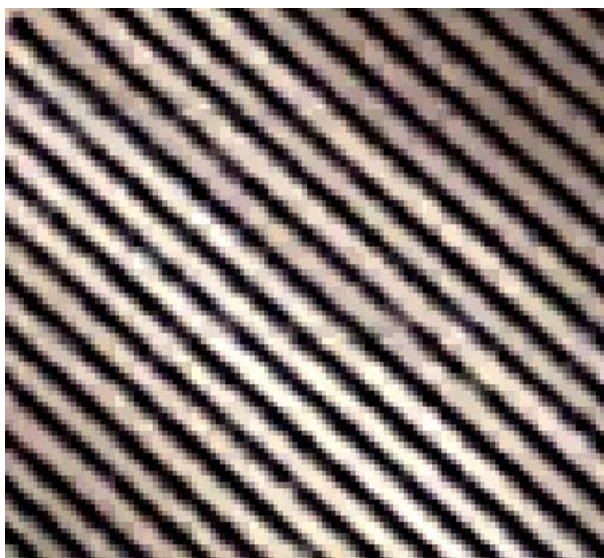
	ΑΜΠΕΛΙ	ΕΔΑΦΟΣ	ΑΘΡΟΙΣΜΑ	P.A.
ΑΜΠΕΛΙ	163135.0	0.0	163135.0	0.99
ΕΔΑΦΟΣ	326.0	0.0	326.0	0.0
ΑΘΡΟΙΣΜΑ	163461.0	0.0	kappa:	0.0
U.A.	0.99	0.0	O.A.:	0.99

Πίνακας 4.86. Πίνακας Σύγχυσης της εκπαίδευσης του Πειράματος 5.

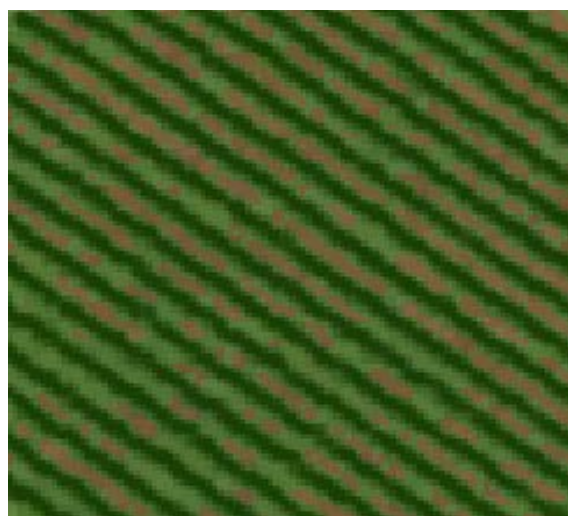
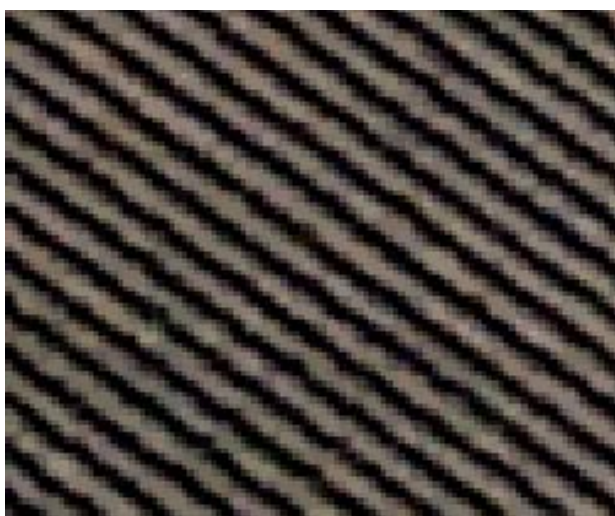
Στη συνέχεια, πραγματοποιήθηκε η ταξινόμηση με Random Forest σε κάθε περιοχή μελέτης ξεχωριστά.

Αμύνταιο

Για την περιοχή του Αμυνταίου, η ταξινόμηση που προέκυψε ήταν ικανοποιητική, καθώς σε μεγάλο βαθμό τα εικονοστοιχεία ταξινομήθηκαν στις κατηγορίες που ανήκουν στην πραγματικότητα. Μία περιορισμένη αστοχία παρατηρείται στην κατηγορία Έδαφος, καθώς ο ταξινομητής κατηγοριοποίησε ένα μέρος των εικονοστοιχείων εδάφους στην κατηγορία Αμπέλι. Η αστοχία οφείλεται στην έντονη αυτοφυή βλάστηση που υπάρχει ενδιάμεσα των γραμμών αμπέλου, που κάνει τη φασματική συμπεριφορά του εδάφους να μοιάζει με αυτή των αμπελιών. Παρακάτω παρουσιάζονται ένα στιγμιότυπο επιτυχούς ταξινόμησης και ένα άστοχης ταξινόμησης.



*Εικόνα 4.126. Εύστοχη ταξινόμηση στην περιοχή του Αμυνταίου
(πράσινο χρώμα: Αμπέλι, καφέ χρώμα: Έδαφος).*



*Εικόνα 4.127. Άστοχη ταξινόμηση στην περιοχή του Αμυνταίου
(πράσινο χρώμα: Αμπέλι, καφέ χρώμα: Έδαφος).*

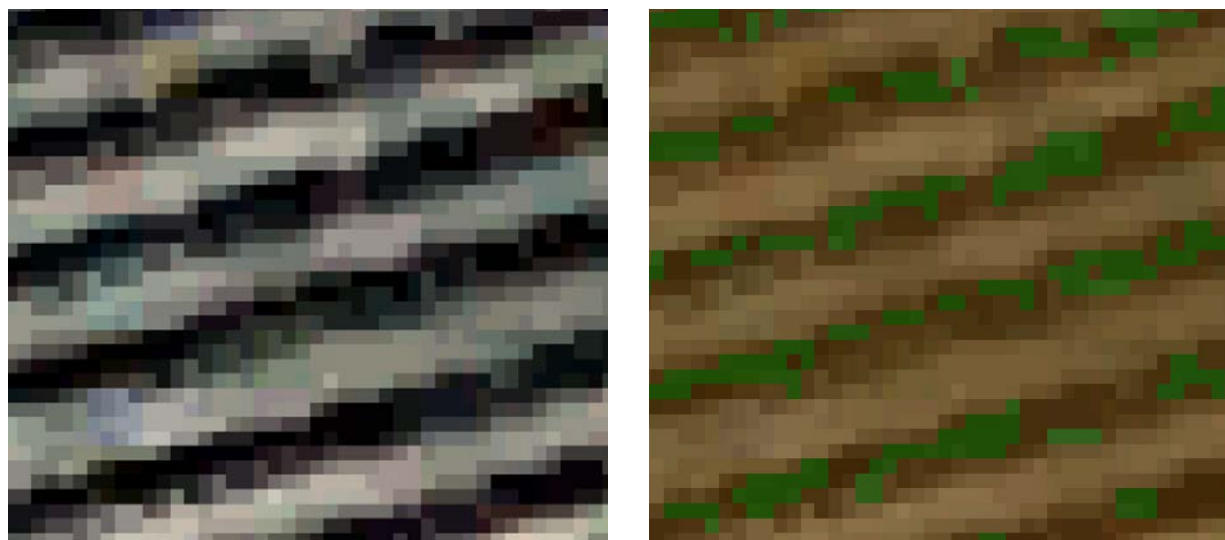
Και ο Πίνακας Σύγκυσης της ταξινόμησης αιτιολογεί τον επιτυχή εντοπισμό του φυλλώματος, καθώς η Ολική Ακρίβεια ανέρχεται στο 95% και ο δείκτης kappa στο 0,8. Επιπρόσθετα, είναι λίγα τα εικονοστοιχεία αμπελιού που ταξινομήθηκαν λανθασμένα, σε αντίθεση με αρκετά εικονοστοιχεία εδάφους που ταξινομήθηκαν στην κατηγορία Αμπέλι.

	ΑΜΠΕΛΙ	ΕΔΑΦΟΣ	ΑΘΡΟΙΣΜΑ	P.A.
ΑΜΠΕΛΙ	93394.0	6047.0	99441.0	0.94
ΕΔΑΦΟΣ	49.0	14566.0	14615.0	0.99
ΑΘΡΟΙΣΜΑ	93443.0	20613.0	kappa:	0.8
U.A.	0.99	0.71	O.A.:	0.95

Πίνακας 4.87. Πίνακας Σύγκυσης της ταξινόμησης του Αμυνταίου στο Πείραμα 5.

Επανομή

Για την περιοχή της Επανομής η ταξινόμηση ήταν ανεπιτυχής, καθώς ο ταξινομητής δεν κατάφερε να εντοπίσει το φύλλωμα και ταξινόμησε μεγάλο μέρος των εικονοστοιχείων αμπελιού στην κατηγορία Έδαφος. Αυτή η αστοχία οφείλεται σε ελλιπή εκπαίδευση του ταξινομητή, δηλαδή τα δεδομένα εκπαίδευσης που χρησιμοποιήθηκαν δεν κάλυπταν επαρκώς τη φασματική συμπεριφορά των εικονοστοιχείων των αμπελιών στην περιοχή της Επανομής. Στην κατηγορία Έδαφος η ταξινόμηση ήταν εύστοχη. Ακολουθώς παρατίθεται ένα στιγμιότυπο της αστοχίας της ταξινόμησης.



Εικόνα 4.128. Άστοχη ταξινόμηση στην περιοχή της Επανομής (πράσινο χρώμα: Αμπέλι, καφέ χρώμα: Έδαφος).

Όπως φαίνεται και στον Πίνακα Σύγκυσης της ταξινόμησης, τα εικονοστοιχεία αμπελιού που ταξινομήθηκαν λανθασμένα στην κατηγορία Έδαφος είναι σχεδόν διπλάσια από αυτά που ταξινομήθηκαν σωστά στην κατηγορία Αμπέλι. Για το λόγο

αυτό οι τιμές της Ολικής Ακρίβειας και του δείκτη kappa είναι πολύ χαμηλές (Ο.Α. = 42%, kappa = 0,07).

	ΑΜΠΕΛΙ	ΕΔΑΦΟΣ	ΑΘΡΟΙΣΜΑ	P.A.
ΑΜΠΕΛΙ	62071.0	3.0	62074.0	0.99
ΕΔΑΦΟΣ	101540.0	10190.0	111730.0	0.09
ΑΘΡΟΙΣΜΑ	163611.0	10193.0	kappa:	0.07
Ο.Α.	0.38	0.99	Ο.Α.:	0.42

Πίνακας 4.88. Πίνακας Σύγκρισης της ταξινόμησης της Επανομής στο Πείραμα 5.

Για τη συνολική αξιολόγηση της ταξινόμησης του Random Forest στο Πείραμα 5, παρατίθεται ένας πίνακας με τα βασικότερα ποσοτικά μέτρα αξιολόγησης για την κάθε περιοχή μελέτης.

TRAIN	PREDICTION	kappa	Ο.Α.
D / M	A	0,8	95,0%
D / M	E	0,07	42,0%

Πίνακας 4.89. Πίνακας συγκεντρωτικών ποσοτικών αποτελεσμάτων για το Πείραμα 5.

Όπως φαίνεται και στον Πίνακα 4.86, ο ταξινομητής Random Forest επέφερε επιτυχή ταξινόμηση στην εικόνα του Αμυνταίου και απέτυχε να ταξινομήσει σωστά την εικόνα της Επανομής. Το συμπέρασμα που προκύπτει είναι ότι οι περιοχές εκπαίδευσης (Δράμα, Μαντίνεια) μοιάζουν φασματικά περισσότερο με την περιοχή του Αμυνταίου και για το λόγο αυτό ο αλγόριθμος ταξινόμησε πιο σωστά αυτή την εικόνα. Επομένως, ο αλγόριθμος ήταν ανεπαρκώς εκπαιδευμένος να ταξινομήσει την εικόνα της Επανομής, γιατί σε αυτή την περιοχή πιθανότατα χρησιμοποιούνται άλλες καλλιεργητικές τεχνικές και η βλάστηση ήταν σε πιο προχωρημένη ωρίμανση. Αυτό είχε σαν αποτέλεσμα το φύλλωμα των πρέμνων να είναι πιο σκούρο από το φυσιολογικό και να μπερδεύεται η φασματική του απόκριση με αυτή του εδάφους.

5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ

Στο παρόν κεφάλαιο συνοψίζονται τα συμπεράσματα που εξήχθησαν από την αξιολόγηση των αποτελεσμάτων, από την οποία προκύπτει ότι οι στόχοι που τέθηκαν στα πλαίσια της παρούσας εργασίας εκπληρώθηκαν σε σημαντικό βαθμό. Πιο συγκεκριμένα, υλοποιήθηκαν πειράματα με χρήση του ταξινομητή Random Forest για το διαχωρισμό του φυλλώματος των αμπελιών από το έδαφος και την εξαγωγή των γραμμών φύτευσης στα αμπελοτεμάχια. Για τη διευκόλυνση της ταξινόμησης λήφθηκαν υπόψη, εκτός από τις τιμές κάθε εικονοστοιχείου στα οκτώ πολυφασματικά κανάλια, και κάποια επιπλέον χαρακτηριστικά: το χαρακτηριστικό της Υφής (κατά Gabor), ο Δείκτης Βλάστησης NDVI, οι Δείκτες Βλάστησης με Προσαρμογή Εδάφους MSAVI και OSAVI, ο Δείκτης Βλάστησης με Τροποποιημένη Επιρροή Χλωροφύλλης TCARI.

Στο πρώτο σκέλος του πειραματισμού, εφαρμόστηκε η ταξινόμηση με τον αλγόριθμο Random Forest για κάθε περιοχή μελέτης ξεχωριστά. Για την ταξινόμηση χρησιμοποιήθηκαν μόνο τα δεδομένα ελέγχου που είχαν συλλεχθεί για κάθε περιοχή, ώστε να εκπαιδευτεί ο αλγόριθμος. Πραγματοποιήθηκαν πειράματα σε κάθε εικόνα ξεχωριστά με χρήση διαφορετικού ποσοστού δεδομένων εκπαίδευσης, ώστε να εξακριβωθεί η ευαισθησία του ταξινομητή. Τα αποτελέσματα της ταξινόμησης σε όλες τις περιοχές μελέτης κατέδειξαν σταθερότητα του Random Forest, καθώς οι ταξινομήσεις ήταν επιτυχείς ακόμα και με χρήση μόνο του 5% των δεδομένων για την εκπαίδευση. Στα περισσότερα πειράματα η Ολική Ακρίβεια είχε πολύ υψηλές τιμές, φτάνοντας ακόμα και το 99%.

Σημαντικό ρόλο για την επιτυχία της ταξινόμησης διαδραματίζει η ενδεδειγμένη και σχολαστική συλλογή δεδομένων ελέγχου σε κάθε δορυφορική εικόνα. Η ψηφιοποίηση των δεδομένων πρέπει να είναι λεπτομερής, δηλαδή σε κάθε δείγμα που λαμβάνεται να εμπεριέχονται αμιγώς εικονοστοιχεία Αμπελιού ή Εδάφους, ώστε τα δείγματα να είναι αντιπροσωπευτικά της κατηγορίας στην οποία ανήκουν. Επιπρόσθετα, πρέπει να συλλέγονται δείγματα για όλες τις φασματικές υπογραφές που παρουσιάζει κάθε κατηγορία, καθώς η φασματική συμπεριφορά τόσο του φυλλώματος όσο και του εδάφους ποικίλει σε κάθε περιοχή μελέτης.

Η αποτελεσματικότητα του ταξινομητή ήταν ικανοποιητική σε μεγάλο εύρος περιοχών, που χαρακτηρίζονται από φασματική ανομοιογένεια λόγω των διαφορετικών εδαφοκλιματικών συνθηκών και καλύπτουν διαφορετικές οινοπαραγωγικές ζώνες στη βόρεια, την κεντρική και τη νότια Ελλάδα. Επομένως, προτείνεται η χρήση του ταξινομητή Random Forest για τον εντοπισμό του φυλλώματος των αμπελιών και το διαχωρισμό του από το έδαφος, χρησιμοποιώντας δεδομένα εκπαίδευσης και αξιολόγησης από τα δεδομένα ελέγχου της εκάστοτε περιοχής, που θα πληρούν τις παραπάνω απαιτήσεις.

Στο δεύτερο σκέλος των πειραμάτων, επιχειρήθηκε η ταξινόμηση εικόνων εκπαιδύοντας τον αλγόριθμο Random Forest με δεδομένα ελέγχου από διαφορετικές περιοχές μελέτης. Σκοπός ήταν να συνδυαστούν δεδομένα από πολλές

δορυφορικές εικόνες για την εκπαίδευση του αλγορίθμου, που να τον καταστήσουν ικανό να διαχωρίσει το φύλλωμα των αμπελιών από το ενδιάμεσο έδαφος σε άλλες περιοχές μελέτης.

Σε αυτό το εγχείρημα, ο ταξινομητής δεν ανταποκρίθηκε ικανοποιητικά για όλους τους συνδυασμούς περιοχών εκπαίδευσης και περιοχών ταξινόμησης. Υπήρξε δυσκολία εντοπισμού του φυλλώματος των αμπελιών και σε κάποιες περιπτώσεις προέκυψε αντίστροφη ταξινόμηση, δηλαδή εικονοστοιχεία αμπελιών ταξινομήθηκαν στην κατηγορία Έδαφος και το αντίστροφο. Για τις περιπτώσεις που υπήρξε αστοχία διαχωρισμού των αμπελιών από το έδαφος αυτό οφείλεται κυρίως στα παρακάτω:

- ✓ Ακολουθούνται διαφορετικές καλλιεργητικές πρακτικές στους αμπελώνες σε κάθε περιοχή. Λόγω του γραμμικού προτύπου της καλλιέργειας αμπέλου, το ενδιάμεσο έδαφος είναι πολύ επιρρεπές στη διάβρωση από το νερό. Επομένως, σε περιοχές όπου οι βροχοπτώσεις είναι έντονες και η κλίση των αμπελώνων είναι μεγάλη, οι αμπελουργοί επιλέγουν να μην απομακρύνουν την ενδιάμεση βλάστηση από το έδαφος, ώστε να το προστατεύσουν από τη διάβρωση και την υποβάθμιση που επέρχεται όταν χάνεται το επιφανειακό στρώμα του εδάφους και μειώνεται το βάθος του. Επομένως, τα εικονοστοιχεία του εδάφους στις δορυφορικές εικόνες παρουσιάζουν παραπλήσια φασματική συμπεριφορά με αυτά των αμπελιών, λόγω της βλάστησης που φέρουν.
- ✓ Σε κάποιες περιοχές, λόγω των υψηλών θερμοκρασιών του καλοκαιριού, χρησιμοποιείται ηλιοπροστασία στα αμπέλια, δηλαδή τα φυτά καλύπτονται με κάποιο υλικό ώστε να προστατευτούν από την άμεση ηλιακή ακτινοβολία. Σε αυτές τις περιπτώσεις, αλλοιώνεται η φασματική υπογραφή των αμπελιών, καθώς και η τιμή που φέρουν για τους δείκτες βλάστησης, με αποτέλεσμα να συγχέονται οι τιμές με αυτές που φέρουν τα εικονοστοιχεία του εδάφους.
- ✓ Στο στάδιο της ωρίμανσης των αμπελιών, το χρώμα των φύλλων τους μεταβάλλεται και γίνεται πιο σκούρο, πλησιάζοντας στον τόνο του καφέ χρώματος. Η φασματική υπογραφή των αμπελιών σε αυτό το στάδιο μοιάζει με αυτή του εδάφους. Επομένως, στα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν, τα οποία συλλέχθηκαν στα μέσα του Ιουλίου, αυτή η μεταβολή του χρώματος είχε ήδη ξεκινήσει σε κάποιες περιοχές, με αποτέλεσμα να προκαλείται σύγχυση στην ταξινόμηση.
- ✓ Η φασματική απόκριση του εδάφους παρουσιάζει μεγάλη ποικιλομορφία, καθώς μπορεί να φέρει από σκούρο έως πολύ ανοιχτό χρώμα. Τα εδάφη που έχουν υψηλή υγρασία, είτε λόγω ποτίσματος είτε λόγω βροχόπτωσης, καθώς και τα αργιλώδη εδάφη (που έχουν πιο βαριά κοκκομετρική σύσταση) έχουν κατά κανόνα πιο σκούρο χρώμα. Τα αμμώδη εδάφη (που έχουν πιο ελαφριά κοκκομετρική σύσταση), τα εδάφη που έχουν σαν μητρικό υλικό τον ασβεστόλιθο (που έχει σχεδόν άσπρο χρώμα), καθώς και τα εδάφη που καλύπτονται από πέτρες ή χαλίκια έχουν πιο ανοιχτό χρώμα. Επομένως, κάθε τύπος εδάφους παρουσιάζει διαφορετική φασματική συμπεριφορά, που κάποιες φορές μπορεί να μπερδευτεί με αυτή των αμπελιών.

Οι παραπάνω λόγοι συνεισέφεραν στη μείωση της Ολικής Ακρίβειας σε ορισμένα πειράματα, όπου η Ολική Ακρίβεια έπεσε χαμηλότερα του 50%. Υπήρξαν όμως και πειράματα όπου η τιμή της Ολικής Ακρίβειας ήταν πολύ υψηλότερη (90-99%). Σε αυτές τι περιπτώσεις, παρατηρήθηκαν δύο φαινόμενα: α) οι υπό ταξινόμηση περιοχές συμμετείχαν και στην εκπαίδευση του αλγορίθμου ή β) κάποια από τις περιοχές μελέτης που συμμετείχε στην εκπαίδευση του ταξινομητή έμοιαζε φασματικά με την υπό ταξινόμηση περιοχή.

Συμπερασματικά, είναι εφικτή η ταξινόμηση μίας περιοχής μελέτης με τον ταξινομητή Random Forest, χρησιμοποιώντας δεδομένα εκπαίδευσης άλλης περιοχής με την προϋπόθεση ότι πρέπει οι περιοχές αυτές να παρουσιάζουν φασματικές ομοιότητες στις δύο κατηγορίες ταξινόμησης (Αμπέλι, Έδαφος).

Ακολουθούν κάποιες προτάσεις που θα μπορούσαν να βελτιώσουν ή/και να επεκτείνουν την παρούσα εργασία:

- ✓ Εφαρμογή και αξιολόγηση της συγκεκριμένης μεθοδολογίας σε μεγαλύτερο πλήθος ή/και άλλο είδος δεδομένων από διαφορετικούς δέκτες.
- ✓ Μελέτη και εφαρμογή διαφορετικών προσεγγίσεων, μεθοδολογιών και λογισμικών για την προεπεξεργασία των δεδομένων.
- ✓ Χρήση και άλλων χαρακτηριστικών (features) των εικονοστοιχείων στα πλαίσια της ταξινόμησης (π.χ. δείκτες βλάστησης) και πειραματισμός με διαφορετικούς συνδυασμούς αυτών.
- ✓ Λήψη δεδομένων από Μη Επανδρωμένα Εναέρια Οχήματα (UAV) και συνδυασμός τους με τις δορυφορικές εικόνες.
- ✓ Εκτενέστερη κατάτμηση των κατηγοριών ταξινόμησης, με τις κατηγορίες Αμπέλι και Έδαφος να περιλαμβάνουν υποκατηγορίες με τις επιμέρους φασματικές συμπεριφορές που παρουσιάζουν τα δύο στοιχεία σε κάθε περιοχή μελέτης.
- ✓ Μελέτη και εφαρμογή και άλλων αλγορίθμων επιβλεπόμενης ταξινόμησης, όπως Support Vector Machine.
- ✓ Συνδυασμός του προτεινόμενου συστήματος ταξινόμησης με άλλες τεχνικές αμπελουργίας ακριβείας, όπως η παραγωγή χαρτών τηλεπισκοπικών δεικτών και η στατιστική ανάλυση υπερφασματικών δεδομένων, με στόχο τη δημιουργία ενός εργαλείου γεωπληροφορικής που θα διαχειρίζεται ολοκληρωμένα την παρακολούθηση της καλλιέργειας του αμπελιού.
- ✓ Σε γενικότερο πλαίσιο, συνεργασία με τους άμεσα εμπλεκόμενους στην καλλιέργεια του αμπελιού και στην παραγωγή κρασιού (γεωπόνους, οινολόγους, αμπελουργούς, οινοποιούς), με στόχο τη φυσική/βιολογική ερμηνεία των αποτελεσμάτων και τον επαναπροσδιορισμό των στόχων και αναγκών του μελετώμενου ζητήματος.

BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Διεθνής Βιβλιογραφία

1. Al-doski J., Mansor S., Shafri H., 2013. **Image Classification in Remote Sensing**, Journal of Environment and Earth Science, 3, (10), pp. 141-147.
2. Bramley, R. G. V. , 2003. **Smarter thinking on soils survey**, *Australian and New Zealand Wine Industry Journal*, vol. 18, pp. 88–94.
3. Bramley, R. G. V., & Proffitt, A. P. B., 1999. **Managing variability in viticultural production**, *Australian and New Zealand Grapegrower and Winemaker*, vol. 427, pp. 11–16.
4. Cinat, P., Gennaro, S., Berton, A., Matese, A., 2019. **Comparison of Unsupervised Algorithms for Vineyard Canopy Segmentation from UAV Multispectral Images**. *Remote Sensing*, 11, pp. 1023-1047.
5. Criminisi, A., Konukoglu, E., Shotton, J., 2011. **Decision Forests for Classification, Regression, Density Estimation, Manifold Learning and Semi-Supervised Learning**.
6. Fridgen, J. J., Kitchen, N. R., Sudduth, K. A., Drummond, S. T., Wiebold, W. J., & Fraisse, C. W., 2004. **Management zone analyst (MZA): Software for subfield management zone delineation**, *Agronomy Journal*, vol. 96, pp. 100–108.
7. Haboudane, D., Miller, J. R., Tremblay, N., Zarco-Tejada, P. J., & Dextraze, L. 2002. **Integration of hyperspectral vegetation indices for prediction of crop chlorophyll content for application to precision agriculture**. *Remote Sensing of Environment*, 81(2–3), pp. 416–426.
8. Hall, A., Lamb, D. W., Holzapfel, B. P., & Louis, J. P., 2011. **Within-season temporal variation in correlations between vineyard canopy and winegrape composition and yield**, *Precision Agriculture*, vol. 12, pp. 103–117.
9. Hansen, P. M., & Schjoerring, J. K., 2003. **Reflectance measurement of canopy biomass and nitrogen status in wheat crops using normalized difference vegetation indices and partial least squares regression**, *Remote Sensing Environment*, vol. 86, pp. 542–553.
10. Hui, J., Zuowei, S., Yufei, Z., 2017. **Digital Gabor filters do generate MRA-based wavelet tight frames**. *Applied and Computational Harmonic Analysis*, 47 (1), 87-108.

11. Jakob Briem, G.; Member, A.; Atli Benediktsson, J.; Member, S.; Sveinsson, J.R., 2002. **Multiple Classifiers Applied to Multisource Remote Sensing Data**. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 2002, 40, doi:10.1109/TGRS.2002.802476.
12. Johnson, L. F., Pierce, L., DeMartino, J., Youkhana, S., Nemani, R., Bosch, D., 2003. **Image-Based Decision Tools for Vineyard Management**, *ASAE Annual International Meeting*.
13. Johnson, L. F., Roczen, D. E., Youkhana, S. K., Nemani, R. R., & Bosch, D. F., 2003. **Mapping vineyard leaf area with multispectral satellite imagery**, *Computers and Electronics in Agriculture*, vol. 38, pp. 33–44.
14. Karakizi, C., Karantzalos, K., 2015. **Detecting and Classifying Vine Varieties from Very High Resolution Multispectral Data**, *IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS), Milan Italy, 26-31 July 2015*, pp 3401-3404.
15. Kitchen, N. R., Sudduth, K. A., Myers, D. B., Drummond, S. T., & Hong, S. Y., 2005. **Delineating productivity zones on claypan soil fields apparent soil electrical conductivity**, *Computers and Electronics in Agriculture*, vol. 46, pp. 285–308.
16. Kumar, Y., Sahoo, G., 2012. **Analysis of Parametric & Non Parametric Classifiers for Classification Technique using WEKA**. *Int. J. Inf. Technol. Comput. Sci.* 2012, 4, 43–49, doi:10.5815/ijitcs.2012.07.06
17. Miao, X., Heaton, J.S., Zheng, S., Charlet, D.A., Liu, H., 2012. **Applying tree-based ensemble algorithms to the classification of ecological zones using multi-temporal multi-source remote-sensing data**. *Int. J. Remote Sens.* 2012, 33, 1823–1849, doi:10.1080/01431161.2011.602651.
18. Molin, J. P., & Castro, C. N., 2008. **Establishing management zones using soil electrical conductivity and other soil properties by the fuzzy clustering technique**, *Scientia Agricola*, vol. 65(6), pp. 567–573.
19. Mountrakis, G., Im, J., Ogole, C., 2010. **Support vector machines in remote sensing: A review**. *ISPRS J. Photogramm. Remote Sens.* 2011, 66, pp. 247–259.
20. Moral, F. J., Terron, J. M., & Marques da Silva, J. R., 2010. **Delineation of management zones using mobile measurements of soil apparent electrical conductivity and multivariate geostatistical techniques**, *Soil and Tillage Research*, vol. 106(2), pp. 335–343.

21. Nolan, A., Park, S., O' Connell, M., Fuentes, S., Ryu, D., Chung, H., 2015. **Automated detection and segmentation of vine rows using high resolution UAS imagery in a commercial vineyard.** *21st International Congress on Modelling and Simulation*, Gold Coast, Australia, 29 November to 4 December 2015, pp. 1406-1413.
22. Perona, P., Malik, J., 1990. **Scale-Space and Edge Detection Using Anisotropic Diffusion.** *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol. 12, 629-639.
23. Poblete-Echeverría, C., Olmedo, G. F., Ingram, B., Bardeen, M., 2017. **Detection and Segmentation of Vine Canopy in Ultra-High Spatial Resolution RGB Imagery Obtained from Unmanned Aerial Vehicle (UAV): A Case Study in a Commercial Vineyard.** *Remote Sensing*, 9, 268-282.
24. Qi, J., Chehbouni, A., Huete, A. R., Keer, Y. H., & Sorooshian, S., 1994. **A modified soil vegetation adjusted index.** *Remote Sensing of Environment*, 48, 119– 126.
25. Rondeaux, G., Steven, M., & Baret, F., 1996. **Optimization of soil-adjusted vegetation indices.** *Remote Sensing of Environment*, 55, 95–107.
26. Samuel, A., 1959. **Some Studies in Machine Learning Using the Game of Checkers.** *IBM Journal of Research and Development*, 3, pp. 210-229.
27. Schepers, A. R., Shanahan, J. F., Liebig, M. A., Schepers, J. S., Johnson, S. H., & Luchiari, A., 2004. **Appropriateness of management zones for characterizing spatial variability of soil properties and irrigated corn yields across years,** *Agronomy Journal*, vol. 96, pp. 195–203.
28. SCHOWENGERDT, R. A., 1998. **Remote Sensing. Models and Methods for Image Processing.** 2nd ed. xiv + 522 pp. San Diego, London: Academic Press.
29. Stehman, Stephen V., 1997. **Selecting and interpreting measures of thematic classification accuracy.** *Remote Sensing of Environment*, 62 (1), p.p. 77–89.
30. Tagarakis, A., Xatzinikos, A., Fountas, S., Gemtos, T., 2006. **Delineation of management zones in precision viticulture.** In N. Dalezios, M. Salampasis, & S. Tzortzios (Eds.), *Proceedings of the international conference HAICTA (information systems in sustainable agriculture, agroenvironment and food technology)*, pp. 547–554.
31. Tagarakis, A., Liakos, V., Fountas, S., Koundouras, S., Gemtos, T. A., 2012. **Management zones delineation using fuzzy clustering techniques in grapevines,** *Precision Agriculture*, vol. 14, Issue 1, pp. 18-39.

32. Tisseyre, B., Mazzoni, C., Ardoin, N., Clipet, C., 2001. **Yield and harvest quality measurement in precision viticulture - Application for a selective vintage**, In G. Grenier & S. Blackmore (Eds.), *Proceedings of the third European conference on precision agriculture*, pp.133–138.
33. Visa S., Ramsay B., Ralescu A., Van der Knaap E., 2011. **Confusion Matrix-Based Feature Selection**. *Proceedings of the 22nd Midwest Artificial Intelligence and Cognitive Science Conference 2011(MAICS)*, 710, p.p. 120-127.
34. Wample, R. L., Mills, L., & Davenport, J. R., 1999. **Use of precision farming practices in grape production**. In P. Robert, R. H. Rust & W. E. Larson (Eds.), *Proceedings of the IV international conference on precision agriculture*, pp. 897–905.
35. Xie Y., Sha Z., Yu M., 2008. **Remote sensing imagery in vegetation mapping: a review**. *Journal of Plant Ecology*, 1 (1), p.p. 9–23.
36. Yuhendra, Ilham Alimuddin, Josaphat Tetuko Sri Sumantyo, Hiroaki Kuze, 2012. **Assessment of pan-sharpening methods applied to image fusion of remotely sensed multi-band data**. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, vol. 18, pp.165–175.
37. Zarco-Tejada, P. J., Berjon, A., López-Lozano, R., Miller, J. R., Martín, P., Cachorro, V., Gonzalez e, M.R., De Frutos, A., 2005. **Assessing vineyard condition with hyperspectral indices: Leaf and canopy reflectance simulation in a row-structured discontinuous canopy**, *Remote Sensing of Environment*, vol. 99, pp. 271–287.

Ελληνική Βιβλιογραφία

38. Γκίνης, Ι., 2019. **Διερεύνηση Τεχνικών Μεταφοράς Μάθησης για Χαρτογράφηση Κάλυψης Γης με Δεδομένα Αναφοράς Προηγούμενων Ετών**, *Μεταπτυχιακή Εργασία στον τομέα Τοπογραφίας της Σ.Α.Τ.Μ., Ε.Μ.Π.*
39. Γούναρη, Ο., 2018. **Χαρτογράφηση Κάλυψης Γης και Καλλιεργειών με Τεχνικές Μηχανικής Μάθησης από Διαχρονικά Δεδομένα Sentinel-2**, *Διπλωματική Εργασία στον τομέα Τοπογραφίας της Σ.Α.Τ.Μ., Ε.Μ.Π.*
40. Ιατρίδη, Σ., 2018. **Ανίχνευση Μεταβολών και Αναγνώριση των Κατηγοριών τους σε Διαχρονικά Υψηλής Χωρικής Ανάλυσης Τηλεπισκοπικά Δεδομένα**, *Διπλωματική Εργασία στον τομέα Τοπογραφίας της Σ.Α.Τ.Μ., Ε.Μ.Π.*
41. Καρακίζη, Χ., 2013. **Αμπελουργία Ακριβείας: Εντοπισμός αμπελοτεμαχίων και Διαχωρισμός ποικιλιών αμπέλου με Τηλεπισκοπικές μεθόδους**, *Διπλωματική Εργασία στον τομέα Τοπογραφίας της Σ.Α.Τ.Μ., Ε.Μ.Π.*

42. Καρακίζη, Χ., 2015. **Εντοπισμός αμπελοτεμαχίων, Εξαγωγή Γραμμών Φύτευσης και Διαχωρισμός ποικιλιών αμπέλου σε Δορυφορικά Δεδομένα πολύ υψηλής ανάλυσης**, *Μεταπτυχιακή Εργασία στον τομέα Τοπογραφίας της Σ.Α.Τ.Μ., Ε.Μ.Π.*
43. Κανδυλάκης, Ζ., 2013. **Διερεύνηση και Αξιολόγηση Τηλεπισκοπικών Δεδομένων Υψηλής Χωρικής Ανάλυσης στην Αμπελουργία Ακρίβειας**, *Διπλωματική Εργασία στον τομέα Τοπογραφίας της Σ.Α.Τ.Μ., Ε.Μ.Π.*
44. Οικονόμου, Μ., 2014. **Ανάλυση, Συσχέτιση και Αξιολόγηση Τηλεπισκοπικών Δεδομένων, από Δορυφόρους, Μη Επανδρωμένα Εναέρια Οχήματα και Φασματοραδιόμετρα Πεδίου, με εφαρμογές στη Γεωργία Ακρίβειας**, *Διπλωματική Εργασία στον τομέα Τοπογραφίας της Σ.Α.Τ.Μ., Ε.Μ.Π.*
45. Παρχαρίδης, Ι., 2015. **Αρχές Δορυφορικής Τηλεπισκόπησης, Θεωρία και Εφαρμογές**. Ελληνικά Ακαδημαϊκά Ηλεκτρονικά Συγγράμματα και Βοηθήματα.
46. Περάκης, Κ., Φαρασλής, Ι., Μωυσιάδης, Α., 2015. **Η Τηλεπισκόπηση σε 13 Ενότητες: Θεωρία, Μέθοδοι και Εφαρμογές**. Ελληνικά Ακαδημαϊκά Ηλεκτρονικά Συγγράμματα και Βοηθήματα.
47. Τσιώκου, Κ., 2019. **Χαρτογράφηση Καλλιεργειών και Κάλυψης Γης από Διαχρονικά Δεδομένα Sentinel-2 για τα έτη 2016 και 2017**, *Μεταπτυχιακή Εργασία στον τομέα Τοπογραφίας της Σ.Α.Τ.Μ., Ε.Μ.Π.*

Εφαρμογές και Ιστοσελίδες

- 2017, Aristides D. Vaiopoulos, Panfusion: Image fusion - Pansharp App, <https://www.pansharp.com/applications/panfusion/>
- ENVI (version 5.5.1). <https://www.harrisgeospatial.com/Software-Technology/ENVI>
- ERDAS Imagine 2015. www.hexagongeospatial.com
- www.ampeli.gr
- www.gaiapedia.gr
- www.newwinesofgreece.gr
- www.winesurveyor.com
- www.towardsdatascience.com

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

Πίνακας Σχημάτων

Σχήμα 2.1. Σχηματική αναπαράσταση της δομής του ταξινομητή Random Forest. Πηγή: www.medium.com.....44

Σχήμα 3.1 - Φασματικό εύρος για τα κανάλια του δορυφόρου WorldView-3. Πηγή: <http://www.satimagingcorp.com>.....51

Πίνακας Πινάκων

Πίνακας 3.1 – Βασικά χαρακτηριστικά του δορυφόρου WorldView-3. Πηγή: <http://www.satimagingcorp.com>.....49

Πίνακας 3.2 – Βασικά χαρακτηριστικά και Μεταδεδομένα των δορυφορικών εικόνων.....53

Πίνακας 3.3. Πίνακας συνοπτικής περιγραφής τηλεπισκοπικών δεικτών.....77

Πίνακας 3.4. Χαρακτηριστικά πειραμάτων που υλοποιήθηκαν για κάθε περιοχή μελέτης.....83

Πίνακας 3.5. Συνδυασμός δορυφορικών εικόνων σε πειράματα με Random Forest..84

Πίνακας 3.6. Σκελετός του Πίνακα Σύγχυσης. Πηγή: www.towardsdatascience.com..86

Πίνακας 4.1. Πίνακας Σύγχυσης για πείραμα με ratio = 10% στην περιοχή του Αμυνταίου.....89

Πίνακας 4.2. Πίνακας Σύγχυσης για πείραμα με ratio = 20% στην περιοχή του Αμυνταίου.....90

Πίνακας 4.3. Πίνακας Σύγχυσης για πείραμα με ratio = 30% στην περιοχή του Αμυνταίου.....91

Πίνακας 4.4. Πίνακας Σύγχυσης για πείραμα με ratio = 40% στην περιοχή του Αμυνταίου.....92

Πίνακας 4.5. Πίνακας Σύγχυσης για πείραμα με ratio = 50% στην περιοχή του Αμυνταίου.....93

Πίνακας 4.6. Πίνακας Σύγχυσης για πείραμα με ratio = 5% στην περιοχή του Αμυνταίου.....94

Πίνακας 4.7. Πίνακας Συνολικών Ποσοτικών Αποτελεσμάτων για τα πειράματα στην περιοχή του Αμυνταίου.....95

Πίνακας 4.8. Πίνακας Σύγχυσης για πείραμα με ratio = 10% στην περιοχή της Κρήτης.....96

Πίνακας 4.9. Πίνακας Σύγχυσης για πείραμα με ratio = 20% στην περιοχή της Κρήτης.....98

Πίνακας 4.10. Πίνακας Σύγκρισης για πείραμα με $ratio = 30\%$ στην περιοχή της Κρήτης.....	99
Πίνακας 4.11. Πίνακας Σύγκρισης για πείραμα με $ratio = 40\%$ στην περιοχή της Κρήτης.....	100
Πίνακας 4.12. Πίνακας Σύγκρισης για πείραμα με $ratio = 50\%$ στην περιοχή της Κρήτης.....	101
Πίνακας 4.13. Πίνακας Συνολικών Ποσοτικών Αποτελεσμάτων για τα πειράματα στην περιοχή της Κρήτης.....	101
Πίνακας 4.14. Πίνακας Σύγκρισης για πείραμα με $ratio = 50\%$ στην περιοχή της Δράμας.....	103
Πίνακας 4.15. Πίνακας Σύγκρισης για πείραμα με $ratio = 40\%$ στην περιοχή της Δράμας.....	104
Πίνακας 4.16. Πίνακας Σύγκρισης για πείραμα με $ratio = 30\%$ στην περιοχή της Δράμας.....	106
Πίνακας 4.17. Πίνακας Σύγκρισης για πείραμα με $ratio = 20\%$ στην περιοχή της Δράμας.....	107
Πίνακας 4.18. Πίνακας Σύγκρισης για πείραμα με $ratio = 10\%$ στην περιοχή της Δράμας.....	108
Πίνακας 4.19. Πίνακας Σύγκρισης για πείραμα με $ratio = 5\%$ στην περιοχή της Δράμας.....	110
Πίνακας 4.20. Πίνακας Συνολικών Ποσοτικών Αποτελεσμάτων για τα πειράματα στην περιοχή της Δράμας.....	110
Πίνακας 4.21. Πίνακας Σύγκρισης για πείραμα με $ratio = 50\%$ στην περιοχή της Επανομής.....	112
Πίνακας 4.22. Πίνακας Σύγκρισης για πείραμα με $ratio = 40\%$ στην περιοχή της Επανομής.....	112
Πίνακας 4.23. Πίνακας Σύγκρισης για πείραμα με $ratio = 30\%$ στην περιοχή της Επανομής.....	114
Πίνακας 4.24. Πίνακας Σύγκρισης για πείραμα με $ratio = 20\%$ στην περιοχή της Επανομής.....	116
Πίνακας 4.25. Πίνακας Σύγκρισης για πείραμα με $ratio = 10\%$ στην περιοχή της Επανομής.....	117
Πίνακας 4.26. Πίνακας Συνολικών Ποσοτικών Αποτελεσμάτων για τα πειράματα στην περιοχή της Επανομής.....	117

Πίνακας 4.27. Πίνακας Σύγκρισης για πείραμα με ratio = 50% στην περιοχή της Καλής Βρύσης.....	119
Πίνακας 4.28. Πίνακας Σύγκρισης για πείραμα με ratio = 40% στην περιοχή της Καλής Βρύσης.....	120
Πίνακας 4.29. Πίνακας Σύγκρισης για πείραμα με ratio = 30% στην περιοχή της Καλής Βρύσης.....	122
Πίνακας 4.30. Πίνακας Σύγκρισης για πείραμα με ratio = 20% στην περιοχή της Καλής Βρύσης.....	123
Πίνακας 4.31. Πίνακας Σύγκρισης για πείραμα με ratio = 10% στην περιοχή της Καλής Βρύσης.....	124
Πίνακας 4.32. Πίνακας Σύγκρισης για πείραμα με ratio = 5% στην περιοχή της Καλής Βρύσης.....	126
Πίνακας 4.33. Πίνακας Συνολικών Ποσοτικών Αποτελεσμάτων για τα πειράματα στην περιοχή της Καλής Βρύσης.....	126
Πίνακας 4.34. Πίνακας Σύγκρισης για πείραμα με ratio = 50% στην περιοχή της Μαντινείας.....	128
Πίνακας 4.35. Πίνακας Σύγκρισης για πείραμα με ratio = 40% στην περιοχή της Μαντινείας.....	129
Πίνακας 4.36. Πίνακας Σύγκρισης για πείραμα με ratio = 30% στην περιοχή της Μαντινείας.....	130
Πίνακας 4.37. Πίνακας Σύγκρισης για πείραμα με ratio = 20% στην περιοχή της Μαντινείας.....	131
Πίνακας 4.38. Πίνακας Σύγκρισης για πείραμα με ratio = 10% στην περιοχή της Μαντινείας.....	133
Πίνακας 4.39. Πίνακας Σύγκρισης για πείραμα με ratio = 5% στην περιοχή της Μαντινείας.....	134
Πίνακας 4.40. Πίνακας Συνολικών Ποσοτικών Αποτελεσμάτων για τα πειράματα στην περιοχή της Μαντινείας.....	134
Πίνακας 4.41. Πίνακας Σύγκρισης για πείραμα με ratio = 50% στην περιοχή της Νάουσας 1.....	136
Πίνακας 4.42. Πίνακας Σύγκρισης για πείραμα με ratio = 40% στην περιοχή της Νάουσας 1.....	137
Πίνακας 4.43. Πίνακας Σύγκρισης για πείραμα με ratio = 30% στην περιοχή της Νάουσας 1.....	138

Πίνακας 4.44. Πίνακας Σύγκρισης για πείραμα με $\text{ratio} = 20\%$ στην περιοχή της Νάουσας 1.....	140
Πίνακας 4.45. Πίνακας Σύγκρισης για πείραμα με $\text{ratio} = 10\%$ στην περιοχή της Νάουσας 1.....	141
Πίνακας 4.46. Πίνακας Σύγκρισης για πείραμα με $\text{ratio} = 5\%$ στην περιοχή της Νάουσας 1.....	142
Πίνακας 4.47. Πίνακας Συνολικών Ποσοτικών Αποτελεσμάτων για τα πειράματα στην περιοχή της Νάουσας 1.....	142
Πίνακας 4.48. Πίνακας Σύγκρισης για πείραμα με $\text{ratio} = 50\%$ στην περιοχή της Νάουσας 2.....	144
Πίνακας 4.49. Πίνακας Σύγκρισης για πείραμα με $\text{ratio} = 40\%$ στην περιοχή της Νάουσας 2.....	146
Πίνακας 4.50. Πίνακας Σύγκρισης για πείραμα με $\text{ratio} = 30\%$ στην περιοχή της Νάουσας 2.....	147
Πίνακας 4.51. Πίνακας Σύγκρισης για πείραμα με $\text{ratio} = 20\%$ στην περιοχή της Νάουσας 2.....	148
Πίνακας 4.52. Πίνακας Σύγκρισης για πείραμα με $\text{ratio} = 10\%$ στην περιοχή της Νάουσας 2.....	150
Πίνακας 4.53. Πίνακας Σύγκρισης για πείραμα με $\text{ratio} = 5\%$ στην περιοχή της Νάουσας 2.....	151
Πίνακας 4.54. Πίνακας Συνολικών Ποσοτικών Αποτελεσμάτων για τα πειράματα στην περιοχή της Νάουσας 2.....	151
Πίνακας 4.55. Πίνακας Συνολικών Ποσοτικών Αποτελεσμάτων για τα πειράματα σε όλες τις περιοχές μελέτης.....	152
Πίνακας 4.56. Πίνακας Συντομογραφιών για τις περιοχές μελέτης.....	161
Πίνακας 4.57. Περιοχές εκπαίδευσης και πρόβλεψης ταξινόμησης για το Πείραμα 1.....	161
Πίνακας 4.58. Πίνακας Σύγκρισης της εκπαίδευσης του Πειράματος 1.....	161
Πίνακας 4.59. Πίνακας Σύγκρισης της ταξινόμησης της περιοχής του Αμυνταίου στο Πείραμα 1.....	162
Πίνακας 4.60. Πίνακας Σύγκρισης της ταξινόμησης της περιοχής της Δράμας στο Πείραμα 1.....	163
Πίνακας 4.61. Πίνακας Σύγκρισης της ταξινόμησης της περιοχής της Μαντινείας στο Πείραμα 1.....	164

Πίνακας 4.62. Πίνακας Σύγκρισης της ταξινόμησης της περιοχής της Νάουσας 2 στο Πείραμα 1.....	164
Πίνακας 4.63. Πίνακας συγκεντρωτικών ποσοτικών αποτελεσμάτων για το Πείραμα 1.....	165
Πίνακας 4.64. Περιοχές εκπαίδευσης και πρόβλεψης ταξινόμησης για το Πείραμα 2.....	165
Πίνακας 4.65. Πίνακας Σύγκρισης της εκπαίδευσης του Πειράματος 2.....	166
Πίνακας 4.66. Πίνακας Σύγκρισης της ταξινόμησης της περιοχής του Αμυνταίου στο Πείραμα 2.....	167
Πίνακας 4.67. Πίνακας Σύγκρισης της ταξινόμησης της περιοχής της Δράμας στο Πείραμα 2.....	168
Πίνακας 4.68. Πίνακας Σύγκρισης της ταξινόμησης της περιοχής της Νάουσας 2 στο Πείραμα 2.....	168
Πίνακας 4.69. Πίνακας συγκεντρωτικών ποσοτικών αποτελεσμάτων για το Πείραμα 2.....	169
Πίνακας 4.70. Πίνακας Δεδομένων Ελέγχου για τις κατηγορίες ταξινόμησης (Έδαφος, Αμπέλι).....	170
Πίνακας 4.71. Περιοχές εκπαίδευσης και πρόβλεψης ταξινόμησης για το Πείραμα 3.....	170
Πίνακας 4.72. Πίνακας Σύγκρισης της εκπαίδευσης του Πειράματος 3.....	171
Πίνακας 4.73. Πίνακας Σύγκρισης της ταξινόμησης της Νάουσας 2 στο Πείραμα 3.....	172
Πίνακας 4.74. Περιοχές εκπαίδευσης και πρόβλεψης ταξινόμησης για το Πείραμα 4.....	173
Πίνακας 4.75. Πίνακας Σύγκρισης της εκπαίδευσης του Πειράματος 4.....	173
Πίνακας 4.76. Πίνακας Σύγκρισης της ταξινόμησης του Αμυνταίου στο Πείραμα 4.....	174
Πίνακας 4.77. Πίνακας Σύγκρισης της ταξινόμησης της Κρήτης στο Πείραμα 4.....	174
Πίνακας 4.78. Πίνακας Σύγκρισης της ταξινόμησης της Δράμας στο Πείραμα 4....	175
Πίνακας 4.79. Πίνακας Σύγκρισης της ταξινόμησης της Επανομής στο Πείραμα 4...176	
Πίνακας 4.80. Πίνακας Σύγκρισης της ταξινόμησης της Καλής Βρύσης στο Πείραμα 4.....	176
Πίνακας 4.81. Πίνακας Σύγκρισης της ταξινόμησης της Μαντινείας στο Πείραμα 4.....	177

Πίνακας 4.82. Πίνακας Σύγκρισης της ταξινόμησης της Νάουσας 1 στο Πείραμα 4.....	178
Πίνακας 4.83. Πίνακας Σύγκρισης της ταξινόμησης της Νάουσας 2 στο Πείραμα 4.....	179
Πίνακας 4.84. Πίνακας συγκεντρωτικών ποσοτικών αποτελεσμάτων για το Πείραμα 4.....	179
Πίνακας 4.85. Περιοχές εκπαίδευσης και πρόβλεψης ταξινόμησης στο Πείραμα 5..	180
Πίνακας 4.86. Πίνακας Σύγκρισης της εκπαίδευσης του Πειράματος 5.....	180
Πίνακας 4.87. Πίνακας Σύγκρισης της ταξινόμησης του Αμυνταίου στο Πείραμα 5..	182
Πίνακας 4.88. Πίνακας Σύγκρισης της ταξινόμησης της Επανομής στο Πείραμα 5...	183
Πίνακας 4.89. Πίνακας συγκεντρωτικών ποσοτικών αποτελεσμάτων για το Πείραμα 5.....	183

Πίνακας Εικόνων

Εικόνα 2.1 – Ποικιλία Ροζακί. Πηγή: http://www.qaiapedia.gr	17
Εικόνα 2.2 – Ποικιλία Φράουλα. Πηγή: http://www.qaiapedia.gr	18
Εικόνα 2.3 – Ποικιλία Σιδερίτης. Πηγή: http://www.qaiapedia.gr	18
Εικόνα 2.4 – Ποικιλία Μοσχάτο Αμβούργου. Πηγή: http://www.qaiapedia.gr	19
Εικόνα 2.5 – Ποικιλία Αετονύχι άσπρο. Πηγή: http://www.qaiapedia.gr	19
Εικόνα 2.6 – Ποικιλία Cardinal. Πηγή: http://www.qaiapedia.gr	20
Εικόνα 2.7 – Ποικιλία Όψιμος Έδεσσας. Πηγή: http://www.qaiapedia.gr	20
Εικόνα 2.8 – Ποικιλία Όψιμος Σουφλίου. Πηγή: http://www.qaiapedia.gr	21
Εικόνα 2.9 – Ποικιλία Ασύρτικο. Πηγή: http://www.qaiapedia.gr	22
Εικόνα 2.10 – Ποικιλία Αθήρι. Πηγή: http://www.qaiapedia.gr	22
Εικόνα 2.11 – Ποικιλία Μαλαγουζιά. Πηγή: www.winesofgreece.org	23
Εικόνα 2.12 – Ποικιλία Μοσχοφίλερο. Πηγή: www.winesofgreece.org	23
Εικόνα 2.13 – Ποικιλία Σαββατιανό. Πηγή: http://www.qaiapedia.gr	24
Εικόνα 2.14 – Ποικιλία Ρομπόλα. Πηγή: www.winesofgreece.org	24
Εικόνα 2.15 – Ποικιλία Ροδίτης. Πηγή: http://www.qaiapedia.gr	25
Εικόνα 2.16 – Ποικιλία Αηδάνι. Πηγή: http://www.qaiapedia.gr	26
Εικόνα 2.17 – Ποικιλία Μοσχάτο Σάμου. Πηγή: www.winesofgreece.org	26

Εικόνα 2.18 – Ποικιλία Chardonnay. Πηγή: www.winewayoranother.gr	27
Εικόνα 2.19 – Ποικιλία Sauvignon Blanc. Πηγή: www.wikipedia.org	27
Εικόνα 2.20 – Ποικιλία Viognier. Πηγή: www.wikipedia.org	28
Εικόνα 2.21 – Ποικιλία Riesling. Πηγή: http://www.gaiapedia.gr	28
Εικόνα 2.22 – Ποικιλία Αγιωργίτικο. Πηγή: www.winesofgreece.org	29
Εικόνα 2.23 – Ποικιλία Κοτσιφάλι. Πηγή: http://www.gaiapedia.gr	29
Εικόνα 2.24 – Ποικιλία Μανδηλαριά. Πηγή: www.winesofgreece.org	30
Εικόνα 2.25 – Ποικιλία Μαυροδάφνη. Πηγή: www.winesofgreece.org	30
Εικόνα 2.26 – Ποικιλία Νεγκόσκα. Πηγή: www.winesofgreece.org	31
Εικόνα 2.27 – Ποικιλία Ξινόμαυρο. Πηγή: www.winesofgreece.org	31
Εικόνα 2.28 – Ποικιλία Cabernet Sauvignon. Πηγή: www.winewayoranother.gr	32
Εικόνα 2.29 – Ποικιλία Merlot. Πηγή: en.wikipedia.org	32
Εικόνα 2.30 – Ποικιλία Syrah. Πηγή: www.winetraveler.com	33
Εικόνα 2.31 – Ποικιλία Pinot Noir. Πηγή: http://www.gaiapedia.gr	33
Εικόνα 2.32. Αποτέλεσμα ταξινόμησης με αντικειμενοστραφή ανάλυση. Αριστερά: Εντοπισμένο φύλλωμα αμπελιών (πράσινο χρώμα) και ενδιάμεσο έδαφος (καφέ χρώμα). Δεξιά: φυσικό έγχρωμο σύνθετο.....	37
Εικόνα 2.33. Αποτελέσματα ταξινόμησης για τις τρεις μεθόδους. α) Αρχική εικόνα, b) Αποτέλεσμα K-means, c) Αποτέλεσμα Νευρωνικών Δικτύων, d) Αποτέλεσμα Random Forest.....	38
Εικόνα 3.1. Οι περιοχές μελέτης στην Ελλάδα.....	48
Εικόνα 3.2 – Τμήματα των δορυφορικών εικόνων WorldView-3 για τις έξι περιοχές μελέτης σε φυσικό έγχρωμο σύνθετο.....	52
Εικόνα 3.3 – Τμήμα της δορυφορικής εικόνας WorldView-2 για την περιοχή μελέτης της Κρήτης σε φυσικό έγχρωμο σύνθετο.....	53
Εικόνα 3.4. Στιγμιότυπο από την εισαγωγή εικόνας στο ENVI.....	55
Εικόνα 3.5. Στιγμιότυπο από τη ραδιομετρική διόρθωση της πολυφασματικής εικόνας στο ENVI.....	56
Εικόνα 3.6. Στιγμιότυπο από το εργαλείο FLAASH και την κατάλληλη παραμετροποίηση για την ατμοσφαιρική διόρθωση πολυφασματικής εικόνας στο λογισμικό ENVI.....	56

Εικόνα 3.7. Στιγμιότυπο από το εργαλείο <i>Spectral Profile</i> , όπου η κόκκινη καμπύλη απεικονίζει τις τιμές του εικονοστοιχείου μετά την ατμοσφαιρική διόρθωση και η πράσινη τις τιμές στην αρχική πολυφασματική εικόνα.....	57
Εικόνα 3.8. Στιγμιότυπα από της αρχικές (αριστερά) και της ατμοσφαιρικά διορθωμένες πολυφασματικές εικόνες (δεξιά) του δορυφόρου <i>WV3</i>	59
Εικόνα 3.9. Στιγμιότυπο από το εργαλείο <i>Pan-sharpen – HPF Resolution Merge</i> και την παραμετροποίηση για το <i>pan-sharpening</i> εικόνων στο περιβάλλον <i>ERDAS</i>	61
Εικόνα 3.10. Στιγμιότυπα από τις ατμοσφαιρικά διορθωμένες πολυφασματικές εικόνες(αριστερά) και τις συγχωνευμένες (<i>HPF Pan-sharpened</i>) εικόνες (δεξιά).....	64
Εικόνα 3.11. Στιγμιότυπο από την ατμοσφαιρικά διορθωμένη πολυφασματική εικόνα (αριστερά) της Νάουσας και τη συγχωνευμένη (<i>HPF Pan-sharpened</i>) εικόνα (δεξιά).....	64
Εικόνα 3.12. Στιγμιότυπα από τις ατμοσφαιρικά διορθωμένες πολυφασματικές εικόνες (αριστερά) και τις συγχωνευμένες (<i>HPF Pan-sharpened</i>) εικόνες (δεξιά).....	70
Εικόνα 3.13. Ενδεικτικό στιγμιότυπο Ανακατανομής Ιστογράμματος στο κανάλι 2 (Μπλε) στην περιοχή της Επανομής. Πρώτο σχήμα: ιστόγραμμα ατμοσφαιρικά διορθωμένης πολυφασματικής εικόνας. Δεύτερο σχήμα: ιστόγραμμα <i>pan-sharpened</i> εικόνας. Τρίτο σχήμα: ιστόγραμμα <i>rescaled</i> εικόνας.....	71
Εικόνα 3.14. Ψηφιοποιημένα αμπέλια (κόκκινο χρώμα) στην περιοχή της Νάουσας 1, επί της <i>pan-sharpened</i> δορυφορικής εικόνας <i>WV3</i>	72
Εικόνα 3.15. Ψηφιοποιημένα δείγματα γραμμών αμπελιού (πράσινο χρώμα) και εδάφους (καφέ χρώμα) στην περιοχή της Νάουσας 1, επί της <i>pan-sharpened</i> δορυφορικής εικόνας <i>WV3</i>	73
Εικόνα 3.16. Ενδεικτικό δείγμα εξομάλυνσης εικόνας στην περιοχή της Νάουσας 1. Πάνω: <i>Rescaled</i> εικόνα. Κάτω: Εικόνα μετά την εξομάλυνση.....	75
Εικόνα 3.17. Στιγμιότυπο του δείκτη βλάστησης <i>NDVI</i> (αριστερά) και της κατωφλίωσης (δεξιά, κατώφλι=0,35) στην περιοχή του Αμυνταίου.....	78
Εικόνα 3.18. Στιγμιότυπο του δείκτη βλάστησης <i>NDVI</i> (αριστερά) και της κατωφλίωσης (δεξιά, κατώφλι=0,39) στην περιοχή της Καλής Βρύσης.....	78
Εικόνα 3.19. Στιγμιότυπο από τον υπολογισμό της Υφής στην περιοχή της Μαντινείας. Πάνω: <i>Rescaled</i> εικόνα. Κάτω: Υφή της εικόνας.....	79
Εικόνα 4.1. Αμπελοτεμάχια περιοχής Αμυνταίου.....	88
Εικόνα 4.2. Επιτυχής ταξινόμηση. Αριστερά: Πολυφασματική δορυφορική εικόνα (RGB). Δεξιά: Ταξινομημένη εικόνα (πράσινο χρώμα: Αμπέλι, καφέ χρώμα: Έδαφος).....	89

Εικόνα 4.3. Άστοχη ταξινόμηση. Αριστερά: Πολυφασματική δορυφορική εικόνα (RGB). Δεξιά: Ταξινομημένη εικόνα (πράσινο χρώμα: Αμπέλι, καφέ χρώμα: Έδαφος).....	89
Εικόνα 4.4. Επιτυχής ταξινόμηση. Αριστερά: Πολυφασματική δορυφορική εικόνα (RGB). Δεξιά: Ταξινομημένη εικόνα (πράσινο χρώμα: Αμπέλι, καφέ χρώμα: Έδαφος).....	90
Εικόνα 4.5. Άστοχη ταξινόμηση. Αριστερά: Πολυφασματική δορυφορική εικόνα (RGB). Δεξιά: Ταξινομημένη εικόνα (πράσινο χρώμα: Αμπέλι, καφέ χρώμα: Έδαφος).....	90
Εικόνα 4.6. Επιτυχής ταξινόμηση. Αριστερά: Πολυφασματική δορυφορική εικόνα (RGB). Δεξιά: Ταξινομημένη εικόνα (πράσινο χρώμα: Αμπέλι, καφέ χρώμα: Έδαφος).....	91
Εικόνα 4.7. Άστοχη ταξινόμηση. Αριστερά: Πολυφασματική δορυφορική εικόνα (RGB). Δεξιά: Ταξινομημένη εικόνα (πράσινο χρώμα: Αμπέλι, καφέ χρώμα: Έδαφος).....	92
Εικόνα 4.8. Επιτυχής ταξινόμηση. Αριστερά: Πολυφασματική δορυφορική εικόνα (RGB). Δεξιά: Ταξινομημένη εικόνα (πράσινο χρώμα: Αμπέλι, καφέ χρώμα: Έδαφος).....	92
Εικόνα 4.9. Άστοχη ταξινόμηση. Αριστερά: Πολυφασματική δορυφορική εικόνα (RGB). Δεξιά: Ταξινομημένη εικόνα (πράσινο χρώμα: Αμπέλι, καφέ χρώμα: Έδαφος).....	93
Εικόνα 4.10. Επιτυχής ταξινόμηση. Αριστερά: Πολυφασματική δορυφορική εικόνα (RGB). Δεξιά: Ταξινομημένη εικόνα (πράσινο χρώμα: Αμπέλι, καφέ χρώμα: Έδαφος).....	93
Εικόνα 4.11. Άστοχη ταξινόμηση. Αριστερά: Πολυφασματική δορυφορική εικόνα (RGB). Δεξιά: Ταξινομημένη εικόνα (πράσινο χρώμα: Αμπέλι, καφέ χρώμα: Έδαφος).....	94
Εικόνα 4.12. Επιτυχής ταξινόμηση. Αριστερά: Πολυφασματική δορυφορική εικόνα (RGB). Δεξιά: Ταξινομημένη εικόνα (πράσινο χρώμα: Αμπέλι, καφέ χρώμα: Έδαφος).....	95
Εικόνα 4.13. Άστοχη ταξινόμηση. Αριστερά: Πολυφασματική δορυφορική εικόνα (RGB). Δεξιά: Ταξινομημένη εικόνα (πράσινο χρώμα: Αμπέλι, καφέ χρώμα: Έδαφος).....	95
Εικόνα 4.14. Αποτέλεσμα ταξινόμησης στην περιοχή μελέτης του Αμυνταίου (πράσινο χρώμα: φύλλωμα).....	96
Εικόνα 4.15. Αμπελοτεμάχια περιοχής Κρήτης.....	97
Εικόνα 4.16. Επιτυχής ταξινόμηση. Αριστερά: Πολυφασματική δορυφορική εικόνα (RGB). Δεξιά: Ταξινομημένη εικόνα (πράσινο χρώμα: Αμπέλι, καφέ χρώμα: Έδαφος).....	98

Εικόνα 4.17. Άστοχη ταξινόμηση. Αριστερά: Πολυφασματική δορυφορική εικόνα (RGB). Δεξιά: Ταξινομημένη εικόνα (πράσινο χρώμα: Αμπέλι, καφέ χρώμα: Έδαφος).....	98
Εικόνα 4.18. Επιτυχής ταξινόμηση. Αριστερά: Πολυφασματική δορυφορική εικόνα (RGB). Δεξιά: Ταξινομημένη εικόνα (πράσινο χρώμα: Αμπέλι, καφέ χρώμα: Έδαφος).....	99
Εικόνα 4.19. Άστοχη ταξινόμηση. Αριστερά: Πολυφασματική δορυφορική εικόνα (RGB). Δεξιά: Ταξινομημένη εικόνα (πράσινο χρώμα: Αμπέλι, καφέ χρώμα: Έδαφος).....	100
Εικόνα 4.20. Επιτυχής ταξινόμηση. Αριστερά: Πολυφασματική δορυφορική εικόνα (RGB). Δεξιά: Ταξινομημένη εικόνα (πράσινο χρώμα: Αμπέλι, καφέ χρώμα: Έδαφος).....	100
Εικόνα 4.21. Άστοχη ταξινόμηση. Αριστερά: Πολυφασματική δορυφορική εικόνα (RGB). Δεξιά: Ταξινομημένη εικόνα (πράσινο χρώμα: Αμπέλι, καφέ χρώμα: Έδαφος).....	101
Εικόνα 4.22. Επιτυχής ταξινόμηση. Αριστερά: Πολυφασματική δορυφορική εικόνα (RGB). Δεξιά: Ταξινομημένη εικόνα (πράσινο χρώμα: Αμπέλι, καφέ χρώμα: Έδαφος).....	102
Εικόνα 4.23. Άστοχη ταξινόμηση. Αριστερά: Πολυφασματική δορυφορική εικόνα (RGB). Δεξιά: Ταξινομημένη εικόνα (πράσινο χρώμα: Αμπέλι, καφέ χρώμα: Έδαφος).....	102
Εικόνα 4.24. Επιτυχής ταξινόμηση. Αριστερά: Πολυφασματική δορυφορική εικόνα (RGB). Δεξιά: Ταξινομημένη εικόνα (πράσινο χρώμα: Αμπέλι, καφέ χρώμα: Έδαφος).....	103
Εικόνα 4.25. Άστοχη ταξινόμηση. Αριστερά: Πολυφασματική δορυφορική εικόνα (RGB). Δεξιά: Ταξινομημένη εικόνα (πράσινο χρώμα: Αμπέλι, καφέ χρώμα: Έδαφος).....	103
Εικόνα 4.26. Αποτέλεσμα ταξινόμησης στην περιοχή μελέτης της Κρήτης (πράσινο χρώμα: φύλλωμα).....	104
Εικόνα 4.27. Αμπελοτεμάχια περιοχής Δράμας.....	105
Εικόνα 4.28. Επιτυχής ταξινόμηση. Αριστερά: Πολυφασματική δορυφορική εικόνα (RGB). Δεξιά: Ταξινομημένη εικόνα (πράσινο χρώμα: Αμπέλι, καφέ χρώμα: Έδαφος).....	106
Εικόνα 4.29. Άστοχη ταξινόμηση. Αριστερά: Πολυφασματική δορυφορική εικόνα (RGB). Δεξιά: Ταξινομημένη εικόνα (πράσινο χρώμα: Αμπέλι, καφέ χρώμα: Έδαφος).....	106

Εικόνα 4.30. Επιτυχής ταξινόμηση. Αριστερά: Πολυφασματική δορυφορική εικόνα (RGB). Δεξιά: Ταξινομημένη εικόνα (πράσινο χρώμα: Αμπέλι, καφέ χρώμα: Έδαφος).....	107
Εικόνα 4.31. Άστοχη ταξινόμηση. Αριστερά: Πολυφασματική δορυφορική εικόνα (RGB). Δεξιά: Ταξινομημένη εικόνα (πράσινο χρώμα: Αμπέλι, καφέ χρώμα: Έδαφος).....	107
Εικόνα 4.32. Επιτυχής ταξινόμηση. Αριστερά: Πολυφασματική δορυφορική εικόνα (RGB). Δεξιά: Ταξινομημένη εικόνα (πράσινο χρώμα: Αμπέλι, καφέ χρώμα: Έδαφος).....	108
Εικόνα 4.33. Άστοχη ταξινόμηση. Αριστερά: Πολυφασματική δορυφορική εικόνα (RGB). Δεξιά: Ταξινομημένη εικόνα (πράσινο χρώμα: Αμπέλι, καφέ χρώμα: Έδαφος).....	108
Εικόνα 4.34. Επιτυχής ταξινόμηση. Αριστερά: Πολυφασματική δορυφορική εικόνα (RGB). Δεξιά: Ταξινομημένη εικόνα (πράσινο χρώμα: Αμπέλι, καφέ χρώμα: Έδαφος).....	109
Εικόνα 4.35. Άστοχη ταξινόμηση. Αριστερά: Πολυφασματική δορυφορική εικόνα (RGB). Δεξιά: Ταξινομημένη εικόνα (πράσινο χρώμα: Αμπέλι, καφέ χρώμα: Έδαφος).....	110
Εικόνα 4.36. Επιτυχής ταξινόμηση. Αριστερά: Πολυφασματική δορυφορική εικόνα (RGB). Δεξιά: Ταξινομημένη εικόνα (πράσινο χρώμα: Αμπέλι, καφέ χρώμα: Έδαφος).....	111
Εικόνα 4.37. Άστοχη ταξινόμηση. Αριστερά: Πολυφασματική δορυφορική εικόνα (RGB). Δεξιά: Ταξινομημένη εικόνα (πράσινο χρώμα: Αμπέλι, καφέ χρώμα: Έδαφος).....	111
Εικόνα 4.38. Επιτυχής ταξινόμηση. Αριστερά: Πολυφασματική δορυφορική εικόνα (RGB). Δεξιά: Ταξινομημένη εικόνα (πράσινο χρώμα: Αμπέλι, καφέ χρώμα: Έδαφος).....	112
Εικόνα 4.39. Άστοχη ταξινόμηση. Αριστερά: Πολυφασματική δορυφορική εικόνα (RGB). Δεξιά: Ταξινομημένη εικόνα (πράσινο χρώμα: Αμπέλι, καφέ χρώμα: Έδαφος).....	112
Εικόνα 4.40. Αποτέλεσμα ταξινόμησης στην περιοχή μελέτης της Δράμας (πράσινο χρώμα: φύλλωμα).....	113
Εικόνα 4.41. Αμπελοτεμάχια περιοχής Επανομής.....	115
Εικόνα 4.42. Επιτυχής ταξινόμηση. Αριστερά: Πολυφασματική δορυφορική εικόνα (RGB). Δεξιά: Ταξινομημένη εικόνα (πράσινο χρώμα: Αμπέλι, καφέ χρώμα: Έδαφος).....	116

Εικόνα 4.43. Άστοχη ταξινόμηση. Αριστερά: Πολυφασματική δορυφορική εικόνα (RGB). Δεξιά: Ταξινομημένη εικόνα (πράσινο χρώμα: Αμπέλι, καφέ χρώμα: Έδαφος).....	116
Εικόνα 4.44. Επιτυχής ταξινόμηση. Αριστερά: Πολυφασματική δορυφορική εικόνα (RGB). Δεξιά: Ταξινομημένη εικόνα (πράσινο χρώμα: Αμπέλι, καφέ χρώμα: Έδαφος).....	117
Εικόνα 4.45. Άστοχη ταξινόμηση. Αριστερά: Πολυφασματική δορυφορική εικόνα (RGB). Δεξιά: Ταξινομημένη εικόνα (πράσινο χρώμα: Αμπέλι, καφέ χρώμα: Έδαφος).....	117
Εικόνα 4.46. Επιτυχής ταξινόμηση. Αριστερά: Πολυφασματική δορυφορική εικόνα (RGB). Δεξιά: Ταξινομημένη εικόνα (πράσινο χρώμα: Αμπέλι, καφέ χρώμα: Έδαφος).....	118
Εικόνα 4.47. Άστοχη ταξινόμηση. Αριστερά: Πολυφασματική δορυφορική εικόνα (RGB). Δεξιά: Ταξινομημένη εικόνα (πράσινο χρώμα: Αμπέλι, καφέ χρώμα: Έδαφος).....	119
Εικόνα 4.48. Επιτυχής ταξινόμηση. Αριστερά: Πολυφασματική δορυφορική εικόνα (RGB). Δεξιά: Ταξινομημένη εικόνα (πράσινο χρώμα: Αμπέλι, καφέ χρώμα: Έδαφος).....	120
Εικόνα 4.49. Άστοχη ταξινόμηση. Αριστερά: Πολυφασματική δορυφορική εικόνα (RGB). Δεξιά: Ταξινομημένη εικόνα (πράσινο χρώμα: Αμπέλι, καφέ χρώμα: Έδαφος).....	120
Εικόνα 4.50. Επιτυχής ταξινόμηση. Αριστερά: Πολυφασματική δορυφορική εικόνα (RGB). Δεξιά: Ταξινομημένη εικόνα (πράσινο χρώμα: Αμπέλι, καφέ χρώμα: Έδαφος).....	121
Εικόνα 4.51. Άστοχη ταξινόμηση. Αριστερά: Πολυφασματική δορυφορική εικόνα (RGB). Δεξιά: Ταξινομημένη εικόνα (πράσινο χρώμα: Αμπέλι, καφέ χρώμα: Έδαφος).....	122
Εικόνα 4.52. Αποτέλεσμα ταξινόμησης στην περιοχή μελέτης της Επανομής (πράσινο χρώμα: φύλλωμα).....	123
Εικόνα 4.53. Αμπελοτεμάχια περιοχής Καλής Βρύσης.....	124
Εικόνα 4.54. Επιτυχής ταξινόμηση. Αριστερά: Πολυφασματική δορυφορική εικόνα (RGB). Δεξιά: Ταξινομημένη εικόνα (πράσινο χρώμα: Αμπέλι, καφέ χρώμα: Έδαφος).....	125
Εικόνα 4.55. Άστοχη ταξινόμηση. Αριστερά: Πολυφασματική δορυφορική εικόνα (RGB). Δεξιά: Ταξινομημένη εικόνα (πράσινο χρώμα: Αμπέλι, καφέ χρώμα: Έδαφος).....	125

Εικόνα 4.56. Επιτυχής ταξινόμηση. Αριστερά: Πολυφασματική δορυφορική εικόνα (RGB). Δεξιά: Ταξινομημένη εικόνα (πράσινο χρώμα: Αμπέλι, καφέ χρώμα: Έδαφος).....	126
Εικόνα 4.57. Άστοχη ταξινόμηση. Αριστερά: Πολυφασματική δορυφορική εικόνα (RGB). Δεξιά: Ταξινομημένη εικόνα (πράσινο χρώμα: Αμπέλι, καφέ χρώμα: Έδαφος).....	126
Εικόνα 4.58. Επιτυχής ταξινόμηση. Αριστερά: Πολυφασματική δορυφορική εικόνα (RGB). Δεξιά: Ταξινομημένη εικόνα (πράσινο χρώμα: Αμπέλι, καφέ χρώμα: Έδαφος).....	127
Εικόνα 4.59. Άστοχη ταξινόμηση. Αριστερά: Πολυφασματική δορυφορική εικόνα (RGB). Δεξιά: Ταξινομημένη εικόνα (πράσινο χρώμα: Αμπέλι, καφέ χρώμα: Έδαφος).....	128
Εικόνα 4.60. Επιτυχής ταξινόμηση. Αριστερά: Πολυφασματική δορυφορική εικόνα (RGB). Δεξιά: Ταξινομημένη εικόνα (πράσινο χρώμα: Αμπέλι, καφέ χρώμα: Έδαφος).....	129
Εικόνα 4.61. Άστοχη ταξινόμηση. Αριστερά: Πολυφασματική δορυφορική εικόνα (RGB). Δεξιά: Ταξινομημένη εικόνα (πράσινο χρώμα: Αμπέλι, καφέ χρώμα: Έδαφος).....	129
Εικόνα 4.62. Επιτυχής ταξινόμηση. Αριστερά: Πολυφασματική δορυφορική εικόνα (RGB). Δεξιά: Ταξινομημένη εικόνα (πράσινο χρώμα: Αμπέλι, καφέ χρώμα: Έδαφος).....	130
Εικόνα 4.63. Άστοχη ταξινόμηση. Αριστερά: Πολυφασματική δορυφορική εικόνα (RGB). Δεξιά: Ταξινομημένη εικόνα (πράσινο χρώμα: Αμπέλι, καφέ χρώμα: Έδαφος).....	130
Εικόνα 4.64. Επιτυχής ταξινόμηση. Αριστερά: Πολυφασματική δορυφορική εικόνα (RGB). Δεξιά: Ταξινομημένη εικόνα (πράσινο χρώμα: Αμπέλι, καφέ χρώμα: Έδαφος).....	131
Εικόνα 4.65. Άστοχη ταξινόμηση. Αριστερά: Πολυφασματική δορυφορική εικόνα (RGB). Δεξιά: Ταξινομημένη εικόνα (πράσινο χρώμα: Αμπέλι, καφέ χρώμα: Έδαφος).....	132
Εικόνα 4.66. Αποτέλεσμα ταξινόμησης στην περιοχή μελέτης της Καλής Βρύσης (πράσινο χρώμα: φύλλωμα).....	132
Εικόνα 4.67. Αμπελοτεμάχια περιοχής Μαντινείας.....	134
Εικόνα 4.68. Επιτυχής ταξινόμηση. Αριστερά: Πολυφασματική δορυφορική εικόνα (RGB). Δεξιά: Ταξινομημένη εικόνα (πράσινο χρώμα: Αμπέλι, καφέ χρώμα: Έδαφος).....	135

Εικόνα 4.69. Άστοχη ταξινόμηση. Αριστερά: Πολυφασματική δορυφορική εικόνα (RGB). Δεξιά: Ταξινομημένη εικόνα (πράσινο χρώμα: Αμπέλι, καφέ χρώμα: Έδαφος).....	135
Εικόνα 4.70. Επιτυχής ταξινόμηση. Αριστερά: Πολυφασματική δορυφορική εικόνα (RGB). Δεξιά: Ταξινομημένη εικόνα (πράσινο χρώμα: Αμπέλι, καφέ χρώμα: Έδαφος).....	136
Εικόνα 4.71. Άστοχη ταξινόμηση. Αριστερά: Πολυφασματική δορυφορική εικόνα (RGB). Δεξιά: Ταξινομημένη εικόνα (πράσινο χρώμα: Αμπέλι, καφέ χρώμα: Έδαφος).....	137
Εικόνα 4.72. Επιτυχής ταξινόμηση. Αριστερά: Πολυφασματική δορυφορική εικόνα (RGB). Δεξιά: Ταξινομημένη εικόνα (πράσινο χρώμα: Αμπέλι, καφέ χρώμα: Έδαφος).....	138
Εικόνα 4.73. Άστοχη ταξινόμηση. Αριστερά: Πολυφασματική δορυφορική εικόνα (RGB). Δεξιά: Ταξινομημένη εικόνα (πράσινο χρώμα: Αμπέλι, καφέ χρώμα: Έδαφος).....	138
Εικόνα 4.74. Επιτυχής ταξινόμηση. Αριστερά: Πολυφασματική δορυφορική εικόνα (RGB). Δεξιά: Ταξινομημένη εικόνα (πράσινο χρώμα: Αμπέλι, καφέ χρώμα: Έδαφος).....	139
Εικόνα 4.75. Άστοχη ταξινόμηση. Αριστερά: Πολυφασματική δορυφορική εικόνα (RGB). Δεξιά: Ταξινομημένη εικόνα (πράσινο χρώμα: Αμπέλι, καφέ χρώμα: Έδαφος).....	139
Εικόνα 4.76. Επιτυχής ταξινόμηση. Αριστερά: Πολυφασματική δορυφορική εικόνα (RGB). Δεξιά: Ταξινομημένη εικόνα (πράσινο χρώμα: Αμπέλι, καφέ χρώμα: Έδαφος).....	140
Εικόνα 4.77. Άστοχη ταξινόμηση. Αριστερά: Πολυφασματική δορυφορική εικόνα (RGB). Δεξιά: Ταξινομημένη εικόνα (πράσινο χρώμα: Αμπέλι, καφέ χρώμα: Έδαφος).....	140
Εικόνα 4.78. Επιτυχής ταξινόμηση. Αριστερά: Πολυφασματική δορυφορική εικόνα (RGB). Δεξιά: Ταξινομημένη εικόνα (πράσινο χρώμα: Αμπέλι, καφέ χρώμα: Έδαφος).....	141
Εικόνα 4.79. Άστοχη ταξινόμηση. Αριστερά: Πολυφασματική δορυφορική εικόνα (RGB). Δεξιά: Ταξινομημένη εικόνα (πράσινο χρώμα: Αμπέλι, καφέ χρώμα: Έδαφος).....	142
Εικόνα 4.80. Αποτέλεσμα ταξινόμησης στην περιοχή μελέτης της Μαντινείας (πράσινο χρώμα: φύλλωμα).....	143
Εικόνα 4.81. Αμπελοτεμάχια περιοχής Νάουσας 1.....	144

Εικόνα 4.82. Επιτυχής ταξινόμηση. Αριστερά: Πολυφασματική δορυφορική εικόνα (RGB). Δεξιά: Ταξινομημένη εικόνα (πράσινο χρώμα: Αμπέλι, καφέ χρώμα: Έδαφος).....	145
Εικόνα 4.83. Άστοχη ταξινόμηση. Αριστερά: Πολυφασματική δορυφορική εικόνα (RGB). Δεξιά: Ταξινομημένη εικόνα (πράσινο χρώμα: Αμπέλι, καφέ χρώμα: Έδαφος).....	145
Εικόνα 4.84. Επιτυχής ταξινόμηση. Αριστερά: Πολυφασματική δορυφορική εικόνα (RGB). Δεξιά: Ταξινομημένη εικόνα (πράσινο χρώμα: Αμπέλι, καφέ χρώμα: Έδαφος).....	146
Εικόνα 4.85. Άστοχη ταξινόμηση. Αριστερά: Πολυφασματική δορυφορική εικόνα (RGB). Δεξιά: Ταξινομημένη εικόνα (πράσινο χρώμα: Αμπέλι, καφέ χρώμα: Έδαφος).....	146
Εικόνα 4.86. Επιτυχής ταξινόμηση. Αριστερά: Πολυφασματική δορυφορική εικόνα (RGB). Δεξιά: Ταξινομημένη εικόνα (πράσινο χρώμα: Αμπέλι, καφέ χρώμα: Έδαφος).....	147
Εικόνα 4.87. Άστοχη ταξινόμηση. Αριστερά: Πολυφασματική δορυφορική εικόνα (RGB). Δεξιά: Ταξινομημένη εικόνα (πράσινο χρώμα: Αμπέλι, καφέ χρώμα: Έδαφος).....	148
Εικόνα 4.88. Επιτυχής ταξινόμηση. Αριστερά: Πολυφασματική δορυφορική εικόνα (RGB). Δεξιά: Ταξινομημένη εικόνα (πράσινο χρώμα: Αμπέλι, καφέ χρώμα: Έδαφος).....	149
Εικόνα 4.89. Άστοχη ταξινόμηση. Αριστερά: Πολυφασματική δορυφορική εικόνα (RGB). Δεξιά: Ταξινομημένη εικόνα (πράσινο χρώμα: Αμπέλι, καφέ χρώμα: Έδαφος).....	149
Εικόνα 4.90. Επιτυχής ταξινόμηση. Αριστερά: Πολυφασματική δορυφορική εικόνα (RGB). Δεξιά: Ταξινομημένη εικόνα (πράσινο χρώμα: Αμπέλι, καφέ χρώμα: Έδαφος).....	150
Εικόνα 4.91. Άστοχη ταξινόμηση. Αριστερά: Πολυφασματική δορυφορική εικόνα (RGB). Δεξιά: Ταξινομημένη εικόνα (πράσινο χρώμα: Αμπέλι, καφέ χρώμα: Έδαφος).....	150
Εικόνα 4.92. Επιτυχής ταξινόμηση. Αριστερά: Πολυφασματική δορυφορική εικόνα (RGB). Δεξιά: Ταξινομημένη εικόνα (πράσινο χρώμα: Αμπέλι, καφέ χρώμα: Έδαφος).....	151
Εικόνα 4.93. Άστοχη ταξινόμηση. Αριστερά: Πολυφασματική δορυφορική εικόνα (RGB). Δεξιά: Ταξινομημένη εικόνα (πράσινο χρώμα: Αμπέλι, καφέ χρώμα: Έδαφος).....	152
Εικόνα 4.94. Αποτέλεσμα ταξινόμησης στην περιοχή μελέτης της Νάουσας 1 (πράσινο χρώμα: φύλλωμα).....	153

Εικόνα 4.95. Αμπελοτεμάχια περιοχής Νάουσας 2.....	154
Εικόνα 4.96. Επιτυχής ταξινόμηση. Αριστερά: Πολυφασματική δορυφορική εικόνα (RGB). Δεξιά: Ταξινομημένη εικόνα (πράσινο χρώμα: Αμπέλι, καφέ χρώμα: Έδαφος).....	155
Εικόνα 4.97. Άστοχη ταξινόμηση. Αριστερά: Πολυφασματική δορυφορική εικόνα (RGB). Δεξιά: Ταξινομημένη εικόνα (πράσινο χρώμα: Αμπέλι, καφέ χρώμα: Έδαφος).....	155
Εικόνα 4.98. Επιτυχής ταξινόμηση. Αριστερά: Πολυφασματική δορυφορική εικόνα (RGB). Δεξιά: Ταξινομημένη εικόνα (πράσινο χρώμα: Αμπέλι, καφέ χρώμα: Έδαφος).....	156
Εικόνα 4.99. Άστοχη ταξινόμηση. Αριστερά: Πολυφασματική δορυφορική εικόνα (RGB). Δεξιά: Ταξινομημένη εικόνα (πράσινο χρώμα: Αμπέλι, καφέ χρώμα: Έδαφος).....	156
Εικόνα 4.100. Επιτυχής ταξινόμηση. Αριστερά: Πολυφασματική δορυφορική εικόνα (RGB). Δεξιά: Ταξινομημένη εικόνα (πράσινο χρώμα: Αμπέλι, καφέ χρώμα: Έδαφος).....	157
Εικόνα 4.101. Άστοχη ταξινόμηση. Αριστερά: Πολυφασματική δορυφορική εικόνα (RGB). Δεξιά: Ταξινομημένη εικόνα (πράσινο χρώμα: Αμπέλι, καφέ χρώμα: Έδαφος).....	158
Εικόνα 4.102. Επιτυχής ταξινόμηση. Αριστερά: Πολυφασματική δορυφορική εικόνα (RGB). Δεξιά: Ταξινομημένη εικόνα (πράσινο χρώμα: Αμπέλι, καφέ χρώμα: Έδαφος).....	159
Εικόνα 4.103. Άστοχη ταξινόμηση. Αριστερά: Πολυφασματική δορυφορική εικόνα (RGB). Δεξιά: Ταξινομημένη εικόνα (πράσινο χρώμα: Αμπέλι, καφέ χρώμα: Έδαφος).....	159
Εικόνα 4.104. Επιτυχής ταξινόμηση. Αριστερά: Πολυφασματική δορυφορική εικόνα (RGB). Δεξιά: Ταξινομημένη εικόνα (πράσινο χρώμα: Αμπέλι, καφέ χρώμα: Έδαφος).....	160
Εικόνα 4.105. Άστοχη ταξινόμηση. Αριστερά: Πολυφασματική δορυφορική εικόνα (RGB). Δεξιά: Ταξινομημένη εικόνα (πράσινο χρώμα: Αμπέλι, καφέ χρώμα: Έδαφος).....	160
Εικόνα 4.106. Επιτυχής ταξινόμηση. Αριστερά: Πολυφασματική δορυφορική εικόνα (RGB). Δεξιά: Ταξινομημένη εικόνα (πράσινο χρώμα: Αμπέλι, καφέ χρώμα: Έδαφος).....	161
Εικόνα 4.107. Άστοχη ταξινόμηση. Αριστερά: Πολυφασματική δορυφορική εικόνα (RGB). Δεξιά: Ταξινομημένη εικόνα (πράσινο χρώμα: Αμπέλι, καφέ χρώμα: Έδαφος).....	162

Εικόνα 4.108. Αποτέλεσμα ταξινόμησης στην περιοχή μελέτης της Νάουσας 2 (πράσινο χρώμα: φύλλωμα).....	163
Εικόνα 4.109. Διάγραμμα φασματικής συμπεριφοράς Αμπελιών για κάθε περιοχή μελέτης για τα 12 features.....	167
Εικόνα 4.110. Διάγραμμα φασματικής συμπεριφοράς Εδάφους για κάθε περιοχή μελέτης για τα 12 features.....	168
Εικόνα 4.111. Διάγραμμα διαφοράς φασματικής συμπεριφοράς Αμπελιών-φασματικής συμπεριφοράς Εδάφους για κάθε περιοχή μελέτης.....	169
Εικόνα 4.112. Αστοχία ταξινόμησης στην περιοχή του Αμυνταίου (πράσινο χρώμα: Αμπέλι, καφέ χρώμα: Έδαφος).....	173
Εικόνα 4.113. Μερικώς εύστοχη ταξινόμηση στην περιοχή της Μαντινείας (πράσινο χρώμα: Αμπέλι, καφέ χρώμα: Έδαφος).....	174
Εικόνα 4.114. Εύστοχη ταξινόμηση στην περιοχή της Νάουσας 2 (πράσινο χρώμα: Αμπέλι, καφέ χρώμα: Έδαφος).....	175
Εικόνα 4.115. Εύστοχη ταξινόμηση στην περιοχή του Αμυνταίου (πράσινο χρώμα: Αμπέλι, καφέ χρώμα: Έδαφος).....	177
Εικόνα 4.116. Εύστοχη ταξινόμηση στην περιοχή της Δράμας (πράσινο χρώμα: Αμπέλι, καφέ χρώμα: Έδαφος).....	178
Εικόνα 4.117. Εύστοχη ταξινόμηση στην περιοχή της Νάουσας 2 (πράσινο χρώμα: Αμπέλι, καφέ χρώμα: Έδαφος).....	179
Εικόνα 4.118. Εύστοχη ταξινόμηση στην περιοχή της Νάουσας 2 (πράσινο χρώμα: Αμπέλι, καφέ χρώμα: Έδαφος).....	182
Εικόνα 4.119. Άστοχη ταξινόμηση στην περιοχή της Νάουσας 2 (πράσινο χρώμα: Αμπέλι, καφέ χρώμα: Έδαφος).....	183
Εικόνα 4.120. Εύστοχη ταξινόμηση στην περιοχή του Αμυνταίου (πράσινο χρώμα: Αμπέλι, καφέ χρώμα: Έδαφος).....	184
Εικόνα 4.121. Εύστοχη ταξινόμηση στην περιοχή της Δράμας (πράσινο χρώμα: Αμπέλι, καφέ χρώμα: Έδαφος).....	186
Εικόνα 4.122. Εύστοχη ταξινόμηση στην περιοχή της Επανομής (πράσινο χρώμα: Αμπέλι, καφέ χρώμα: Έδαφος).....	187
Εικόνα 4.123. Εύστοχη ταξινόμηση στην περιοχή της Μαντινείας (πράσινο χρώμα: Αμπέλι, καφέ χρώμα: Έδαφος).....	188
Εικόνα 4.124. Εύστοχη ταξινόμηση στην περιοχή της Νάουσας 2 (πράσινο χρώμα: Αμπέλι, καφέ χρώμα: Έδαφος).....	189

Εικόνα 4.125. Άστοχη ταξινόμηση στην περιοχή της Νάουσας 2 (πράσινο χρώμα: Αμπέλι, καφέ χρώμα: Έδαφος).....	190
Εικόνα 4.126. Εύστοχη ταξινόμηση στην περιοχή του Αμυνταίου (πράσινο χρώμα: Αμπέλι, καφέ χρώμα: Έδαφος).....	192
Εικόνα 4.127. Άστοχη ταξινόμηση στην περιοχή του Αμυνταίου (πράσινο χρώμα: Αμπέλι, καφέ χρώμα: Έδαφος).....	192
Εικόνα 4.128. Άστοχη ταξινόμηση στην περιοχή της Επανομής (πράσινο χρώμα: Αμπέλι, καφέ χρώμα: Έδαφος).....	193